



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUSSI JAAKKOSELA

PUTKISILLAN LÄMPÖLIIKKEIDEN AIHEUTTAMIEN VOIMIEN
MÄÄRITTÄMINEN SILTALOHKOJEN LIITOKSILLE JA
KIINTOPISTEILLE

Diplomityö

Tarkastaja: Professori Ralf Lindberg
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tuotantotalouden ja rakentamisen
tiedekunnan kokouksessa
8. marraskuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

JAAKKOSELA, JUSSI: Putkisillan lämpöliikkeiden aiheuttamien voimien määrittäminen siltalohkojen liitoksille ja kiintopisteille

Diplomityö, 71 sivua, 8 liitesivua

Tammikuu 2014

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: Professori Ralf Lindberg

Avainsanat: Putkisillat, putkikannattimet, teollisuusputkistot, lämpökuormat

Teollisuusputkistoa kannattelevat siltarakenteet altistuvat kuormituksille, jotka syntyvät putkiston ja sillan omasta painosta, putkiston ja sillan eriaikaisesta lämpöliikkeestä, putkistossa virtaavien aineiden aiheuttamista pysty- ja vaakasuuntaisista voimista sekä monista ulkoisista kuormista.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan lämpökuormia, jotka syntyvät putkiston kannattimien ja siltarakenteen välisen kitkavoiman seurauksena. Kitkavoiman vastinparina syntyy myös kiintopiste- ja ohjausvoimia, joiden käyttäytymistä ja suuruutta työssä arvioidaan. Työ jakautuu kannattimia, rakenneratkaisuja ja ilmiön teoreettista luonnetta esittelevään alkuosaan ja kokeelliseen tutkimukseen.

Työn perusteella voidaan todeta, että nykyisin yleisesti käytetty tapa laskea lepokitkavoimat koko sillan matkalta yhteen tai käyttää kuormituksena putkistosuunnittelijan joustoanalyysissä annettuja vastaavia voimia on oikean suuntainen, mutta usein konservatiivinen, mikäli voimien kertymistä pienentäviä ilmiöitä ei oteta huomioon. Voimien suuruuden mahdollisimman tarkka määrittäminen auttaa suunnittelemaan siltarakenteen ja perustukset tavalla, joka on tarkoituksenmukainen, taloudellinen ja luotettava.

Putkien kannattamisessa käytettyjen putkikannakkeiden ominaisuudet vaikuttavat syntyviin lämpökuormiin. Myös sillan lohkojaolla ja kiintopisteiden sijoittelulla voidaan vaikuttaa putkisillan lämpökuormiin.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

JAKKOSELA, JUSSI: Defining thermal forces to connections and anchor points in pipe rack structures

Master of Science Thesis, 71 pages, 8 appendix pages

January 2014

Major: Civil Engineering

Examiner: Professor Ralf Lindberg

Keywords: Pipe racks, pipe supports, industrial pipelines, thermal loads

Pipe racks supporting industrial pipelines are subject to various structural loads such as the weight of the pipe system and the support structure itself, the non-simultaneous thermal movement of the pipelines and the pipe bridge, the vertical and lateral forces induced by the substances flowing through the pipes, and also many external loads.

This study focuses on the thermal loads that are generated by friction between the pipeline supports and the bridge structure. This friction force produces anchor forces and guidance forces that function as counterparts of the friction force itself. In this study, I attempt to estimate the behaviour and value of these forces. The study consists of two parts; an introduction discussing supports, structural solutions and the theoretical nature of the phenomenon presented above, and an experimental investigation.

This study shows that the currently favoured way of adding together the static friction forces off the entire length of the pipe bridge or applying the values of the pipe stress analysis is reasonable but often also conservative if the phenomena that lessen the accumulation of the forces are not taken into account. Being able to define the values of the friction forces as precisely as possible will facilitate designing bridge structures and foundations in a way that is practical, economical and reliable.

The thermal loads imposed on the pipe bridge are affected by the properties of the pipe supports that support the pipe system, the division of the bridge blocks, and the placement of the anchor points.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Pöyry Finland Oy:lle. Työn tarkoituksena oli määrittää putkisillan ja putkiston lämpötilavaihtelun seurauksena syntyviä voimia siltarakenteen mitoituksen näkökulmasta.

Työn tarkastajina ja ohjaajina toimivat professori Ralf Lindberg Tampereen teknillisestä yliopistosta sekä Tero Niinimäki, Pekka Toivanen ja Markus Derry Pöyry Finland Oy:stä. Kiitän ohjaajiani saamastani palautteesta ja Pöyry Finland Oy:tä mahdollisuudesta tehdä tämä tutkimus.

Lisäksi haluan kiittää kaikkia työtäni varten haastattelemlani yksityishenkilöitä ja tahoja, jotka vastaamalla kysymyksiini auttoivat työtäni eteenpäin. Toimex Oy:tä kiitän tutkimuksessani käyttämäni kannattimien lainasta, sekä rakennustekniikan laitoksen laboratorion henkilökuntaa avusta kokeellisen tutkimuksen käytännön järjestelyissä. Erityisesti laboratorioinsinööri Jukka Rantalan panos kokeiden ja mittausten onnistumisessa oli merkittävä.

Lisäksi haluan kiittää perhettäni, vaimoani Annaa ja poikaani Lenniä, joka ehti syntyä ja hieman varttuakin ennen työn lopullista kansien väliin saattamista.

Tampereella 15. lokakuuta 2013

Jussi Jaakkosela

SISÄLLYS

Lyhenteet ja merkinnät	V
1. Johdanto	1
2. Tutkimuksen esittely	2
3. Teoreettinen tausta	4
3.1. Teollisuusputkisto	4
3.1.1. Putkiston materiaalien vertailua	6
3.2. Putkisillat	7
3.2.1. Putkisillan rakennesuunnittelun erityiskysymyksiä	10
3.2.2. Putkiston asettelu sillalle	11
3.2.3. Putkiston primäärikannattimet	14
3.2.4. Kitkavoimalle käytetyt mitoitusarvot	18
3.3. Putkiston joustoanalyysi	20
4. Laskennallinen tutkimus	23
4.1. Kannattimilta siirtyvät kuormat	23
4.1.1. Kannattimen pystykuormitus	23
4.1.2. Riippukannattimien välittämät vaakavoimat	25
4.1.3. Liukukannattimien välittämät pituussuuntaiset vaakavoimat	26
4.1.4. Kannattimien välittämät poikittaissuuntaiset vaakavoimat	28
4.2. Kannattimien ja siltarakenteen joustaminen	29
4.2.1. Putkiston joustoanalyysin käyttäminen putkisillan suunnittelussa	31
4.3. Jäykistysjärjestelmät ja putkisillan lohkojako	33
4.4. Rakenneratkaisujen ja tasainten vaikutus voiman suuruuteen	36
4.5. Putkisillan muodonmuutoskyky	40
5. Kokeellinen tutkimus	42
5.1. Koejärjestelyt	42
5.2. Koetulokset	48
6. Tulokset	58
7. Johtopäätökset	60
Lähteet	62
Kuvalähteet	64
Liite 1 : Laskelma putkikannattimien ja palkin joustosta	66
Liite 2 : Laskelma kannatinvoiman todellisesta suuruudesta	69
Liite 3 : Laskelma putkisillan muodonmuutoksesta	71

Lyhenteet ja merkinnät

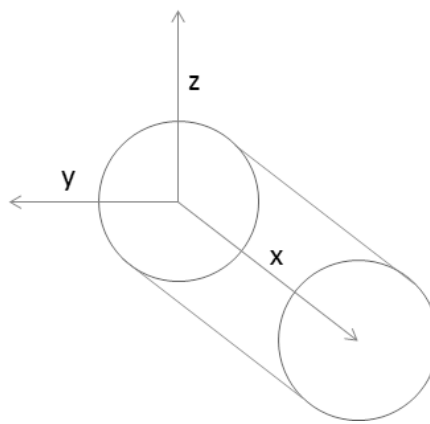
Suureiden SI-järjestelmän mukainen yksikkö merkitty hakasulkeisiin.

A	Poikkileikkauksen ala [m^2]
DN_x	Putken koko x
E	Kimmomoduuli [N/mm^2]
F_{kx}	Kiintopisteellä vaikuttava vaakavoima [kN]
f_y	Teräksen ominaislujuus [N/mm^2]
F_x, F_y, F_z	Voimat koordinaatiston pääsuuntiin [N]
g	Putoamiskiihtyvyys [$9,81 \text{ m/s}^2$]
h	Riippukannattimen ripustuskorkeus [mm]
H	Pilarin korkeus [mm]
I	Jäyhyysmomentti [mm^4]
k	Jousivakio [N/m]
L	Tarkasteltavan kappaleen tai kappaleen osapituus [mm]
L_k	Kannatinväli [mm]
LM-putkisto	Lujitemuoviputkisto (yleisnimi erilaisille polymeeri ja kuituvahvisteisille putkistoille)
q	Viivakuorma, [N/mm]
q_i	Viivakuorma jäädästä, [N/mm]
q_s	Viivakuorma lumesta, [N/mm]
s	Siirtymä [m]
v_{sall}	Sallittu taipuma [mm]
α	Lineaarinen lämpölaajenemiskerroin [$1/\text{K}$] / [$1/^\circ\text{C}$]
ΔL	Pituuden muutos [mm]
ΔT	Lämpötilan muutos [K] / [$^\circ\text{C}$]
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	Siirtymä koordinaatiston pääsuuntiin [mm]
ε	Venymä []
σ	Jännitys [N/mm^2]

μ	Kitkakerroin []
ρ	Materiaalin tiheys [kg/dm ³]

Käytettävä koordinaatisto:

x	-	putken pituussuunta
y	-	putken poikittaissuunta
z	-	pystysuunta



1 JOHDANTO

Putkisillat ovat teollisuuslaitosten yhteydessä esiintyviä rakenteita, jotka kannattelevat prosessin tarvitsemia putkilinjoja rakennuksien tai muiden tuotantotilojen välillä.

Liikennöidyt siltarakenteet kuten rata-, tie- ja kevyenliikenteen sillat ovat yleisyytensä, suurempien julkisten kustannustensa ja yleiseen turvallisuuteen liittyvien syiden vuoksi olleet suuremman mielenkiinnon kohteina niin viranomaisen, lainsäädännön kuin tieteellisen tutkimuksen näkökulmasta. Putkisillat eroavat näistä lainsäädännöllisiltä vaatimuksiltaan, rakenteeltaan ja kuormituksiltaan, mikä tekee sillanrakennukseen liittyvän tutkimuksen ja ohjeistuksen soveltamisen putkisiltoihin vaikeaksi.

Putkisiltojen kuormituksessa siltarakenteen ja kannateltavan putkiston eri tahtiin tapahtuvan lämpöliikkeen aiheuttamat vaakavoimat ovat tärkeässä roolissa. Putkisillalla yleisesti käytettävien liukukannattimien tapauksessa tämä voima aiheutuu kannattimien ja sillan välisestä kitkasta. Konservatiivisin ja yksinkertaisin menetelmä vaakavoiman laskemiseksi putkiston kokonaiskuorman ja kitkakertoimen tulona antaa vaakavoimille suuria arvoja. Tämä aiheuttaa putkisillan jäykistävälle rakenteelle sekä sillan perustuksille vaatimuksia, jotka ovat kalleutensa lisäksi toisinaan myös toteutukseltaan haastavia.

Teollisuuskohteissa kansainvälisen suunnittelun osuus on erittäin suuri. Lämpöliikkeiden aiheutuman kuormituksen huomioimisessa putkisillassa on eri maiden, suunnittelutoimistojen ja tilaajaorganisaation ohjeistuksen suhteen erilaisia käytäntöjä. Rajalliset lähtötiedot pakottavat käyttämään suunnittelussa arvioita, jolloin myös suunnittelijan kokemuksella on suuri vaikutus voimamäärittelyssä. Erilaiset käytännöt ja tulkinnat tuottavat erilaisia rakenneratkaisuja, jotka vaikuttavat rakenteiden kustannuksiin, rakennettavuuteen ja luotettavuuteen.

Pöyry Finland Oy on teettänyt tämän tutkimuksen helpottaakseen rakennesuunnittelijan työtä putkisillan suunnittelutehtävissä. Tutkimuksen tarkoituksena on pyrkiä putkiston lämpöliikkeestä aiheutuvan voiman luotettavaan ja totuudenmukaiseen määrittelyyn. Nykyisin käytetty laskentatapa on varsin konservatiivinen, joten on ennakkoon odotettavissa että tarkempi voiman tarkastelu antaisi voimalle nykyistä pienempiä arvoja. Työssä tarkastellaan myös lämpöliikkeen aiheuttamien voimien suuruuteen vaikuttavia putkistossa ja sillassa esiintyviä rakenneratkaisuja ja annetaan ehdotuksia niiden käytöstä.

2 TUTKIMUKSEN ESITTELY

Tässä työssä tutkitaan putkisillalle putkiston lämpöliikkeistä aiheutuvia voimia. Tutkimusmenetelmä työssä on olemassaolevien tiedon ja käytäntöjen kartoitus, jota tarpeen mukaan täydennetään matemaattisella esityksellä, tietokoneella suoritettulla FEM-laskennalla ja kokeellisella tutkimuksella.

Kokemusperäinen, vanhojen hyväksi havaittujen rakenneratkaisujen toistaminen on tyypillistä putkisiltojen suunnittelussa kuten rakennesuunnittelussa yleisemmin. Putkisiltojen suunnittelun vaatiman pohjatiedon kerääminen tutkimuksessa suoritetaan kirjallisuustutkimuksena, olemassaolevien suunnitelmien tutkimisena, sekä alan asiantuntijoita haastatteleamalla.

Työn pääpaino on putkiston lämpökuormissa. Nämä voimat syntyvät putkiston kannakkeiden ja siltarakenteen välisen kitkan vaikutuksesta. Muita putkisillan kuormituksia eli rakenteiden omaa painoa, lumikuormaa, tuulikuormaa, virtauskitkaa, törmäyskuormia, henkilökuormia yms. ei työn laajuuden vuoksi mahdollista käsitellä. Tässä tutkimuksessa esitetyt putkisillat ja rakenneratkaisut, sekä kuvissa esitetyt periaatteet ovat yleistyksiä, eivätkä kata kaikkia mahdollisia putkisiltarakenteita.

Putkikannattimien osalta eri maissa noudatetaan erilaisia tuotestandardeja, joista työssä käytetty SFS-käsikirja sisältää Suomessa käytetyt kansalliset standardit. Työssä on esitetty myös joitakin ulkomaisia putkikannattintyyppisiä, jotka poikkeavat SFS-käsikirjassa esitetyistä malleista. Erilaisia kannattimia ja kannatinvalmistajia on maailmalla runsaasti, eikä kaikkia erilaisia kannatinratkaisuja ole mahdollista työssä esittää. Rakennesuunnittelija ei voi yleensä vaikuttaa kannattimien käyttöön, joten putkikannattimien käsittely toimii työssä ennen kaikkea esitietona.

Rakennesuunnittelussa käytettävät ratkaisut perustuvat rakennuslainsäädäntöön, normeihin, viranomaisohjeisiin ja standardeihin, joista työssä käsiteltävän ongelman kannalta oleellinen tulee selvittää kirjallisuustutkimuksen keinoin. Ohjeiden soveltamisen ja tulkinnan kannalta tärkeää on myös virkamiesten ja asiantuntijoiden haastattelututkimus. Ulkomaisten käytäntöjen ja ohjeiden osalta työssä käsitellään muutamia maailmalla yleisesti käytössä olevia ohjeistuksia. Ohjeita ja käytäntöjä on runsaasti, eikä kaikkea yritysten sisäistä tietoa ole julkisesti saatavilla. Kappaleessa 3.2.4 esitettyjen lähteiden perusteella Suomessa käytetystä määrittelystä oleellisesti poikkeavaa menettelyä käytetään kansainvälisessä suunnittelussa merkittävissä määrin.

Työn on tarkoitus osaltaan toimia johdantona ja esitietona putkisillan suunnitteluun. Työhön on koottu suunnittelun kannalta olennaiset tiedot teollisuusputkistoista ja niiden kannakoinnista. Työssä sivutaan putkistosuunnitteluun

liittyviä asioita siinä laajuudessa, kuin se on putkiston aiheuttamien lämpökuormien määrittelyn kannalta tarpeellista.

Työn lukijan oletetaan tuntevan rakenteiden mekaniikkaa, yleistä rakennesuunnittelua ja rakenteiden mitoitusta. Työssä esitelty kuormitukset ovat karakteristisia ja esimerkit yksinkertaistuksia, joissa on oleellista ratkaisujen ja laskentaperiaatteiden esittely käytettävistä mitoitusnormeista riippumatta.

3 TEOREETTINEN TAUSTA

Tässä luvussa esitellään putkisto- ja putkisiltarakenteen ominaisuuksia, kerrotaan näiden erilaisista mahdollisista rakenneratkaisuista ja kerrotaan putkisillan kitkavoimalle nykyisin käytettävistä laskenta-arvoista.

Tämän luvun tarkoitus on toimia taustatietona lukujen 4 ja 5 tutkimukselle ja havainnoille.

3.1 Teollisuusputkisto

Teollisuusprosesseissa joissa käsitellään virtaavia aineita on teollisuusputkistolla keskeinen osa laitoksen toiminnassa ja suunnittelussa. Putkistolla voidaan prosessin käyttämien aineiden lisäksi siirtää välittäjäaineen avulla esimerkiksi voimaa (hydraulisesti- tai pneumaattisesti) tai lämpöenergiaa.

Teollisuusputkisto on laaja kokonaisuus, jonka toimintaa ja siihen liittyviä ilmiöitä tarkastellaan monissa eri insinööritieteissä. Varsinainen prosessitekhninen suunnittelu jakaa putkistotyypit esimerkiksi seuraavankaltaisiin ryhmiin: (Kesti, 1992, s. 8-11)

1. Lämmitysputkistot
2. Ilmastointiputkistot
3. Kylmätekhniset putkistot (Cryogeeniset putkistot)
4. Kaasuputkistot
5. Hydrauliiikkaputkistot
6. Pneumaattiset putkistot
7. Suspensioputkistot
8. Korkean lämpötilan putkistot
9. Vaarallisten aineiden putkistot
10. Vesihyöryputkistot
11. Kunnallistekhniset putkistot (Viemärit ja vesijohdot)

Rakennesuunnittelun kannalta putkistojen tyyppin ja varsinaisen toiminnan tunteminen ei yleensä ole välttämätöntä. Putkia kannattelevien rakenteiden kannalta tärkeää on putkiston koko ja paino, sekä putkessa virtaavan aineen tiheys prosessiolosuhteissa. Tarkempaa voimien määrittelyä varten tulisi tuntea putkiston

kannakointi, lämpötilan vaihteluväli sekä putkien materiaaliominaisuudet, lähinnä lineaarinen lämpölaajenemiskerroin.

Putkiston reitityksen ja kannakoinnin suunnittelusta vastaavan putkistosuunnittelijan tulee antaa rakennesuunnittelijalle putkiston aiheuttamat kuormitukset valmiiksi laskettuina voimasuureina. Rakennesuunnittelijalla tulisi tästä huolimatta olla myös yllä kuvatut tiedot sillä putkiston toiminnan syvällisempi ymmärtäminen helpottaa kommunikointia putkisto- ja rakennesuunnittelijan välillä tapauksissa, joissa putkiston reitityksen tai kannakoinnin muutokset ovat välttämättömiä tai mikäli niistä on huomattavaa etua rakennesuunnittelun kannalta. Toisinaan putkisilta joudutaan suunnittelemaan ilman lopullisia putkistosuunnittelijan antamia kuormituksia, jolloin rakennesuunnittelija joutuu määrittelemään putkistovoimat alustavasti, usein puutteellisin tiedoin.

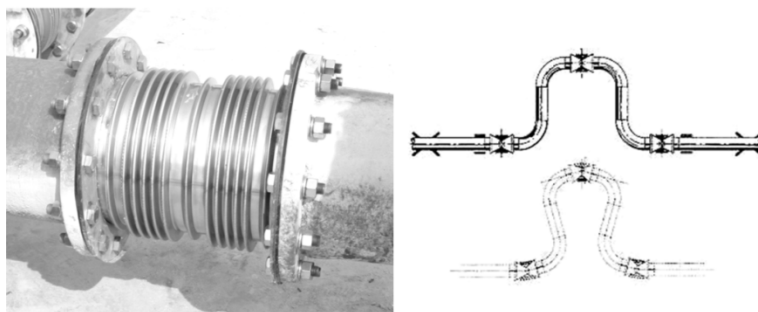
Putkiston aiheuttamien voimien määrittämisperusteiden tarkempi tunteminen johtaa tarkempaan kannattelevien rakenteiden mitoitukseen, josta on hyötyä sekä rakenteiden taloudellisuuden, että luotettavuuden näkökulmasta.

Yhteistä erilaisille putkistojärjestelmille on, että niihin kuuluu osia ja laitteita, joilla aikaansaadaan aineen eteenpäinvirtaus, jakelu ja eri virtojen yhdistäminen, sekä virtauksen nopeuden, paineen ja määrän säätö sekä liitäntä vastaanottolaitteisiin ja mittareihin. Aine voi virrata eteenpäin ns. omakierrokselta omasta painosta tai paineesta johtuen, tai sitä voidaan siirtää pakotetusti erilaisten pumppujen, kompressorien tai puhaltimien avulla.

Putkistossa tapahtuvan virtauksen säätöön käytetään sulku- ja säätöventtiilejä. Virtaavien aineiden aiheuttamalta haitallisen suurelta kuormitukselta suojaa varoventtiilit, jotka estävät paineen nousemisen putkistossa vaarallisen korkeaksi. Kun paine putkistossa ylittää sallitun rajan, varoventtiili avautuu ja päästää liikapaineen ulos verkosta. Höyryputkissa tarvitaan rakenteita ja laitteita, joilla tiivistynyt vesi eli lauhde voidaan erotella putkistosta ulos.

Putkiston lämpötilasta johtuva pituuslaajeneminen tulee huomioida vaurioiden ja epäedullisten muodonmuutosten estämiseksi. Lämpöpitenemä huomioidaan putkistosysteemin lämpöpitenemää kompensoivalla muodolla sekä erityisillä lämpölaajenemista kompensoivilla osilla, joita ovat putken pituussuuntaisen jouston mahdollistavat haitarimaiset paljetasaimet, sekä lämpöä kompensoiva paisuntalenkit eli lyyratasaimet.

Putkiston lämpöliikettä kompensoivien tasaimien vaikutusta putkiston aiheuttamaan kuormitukseen käsitellään tarkemmin luvussa 4.4 Rakenneratkaisujen ja tasainten vaikutus voiman suuruuteen.



Kuva 1 Paljetasain vasemmalla ja lyyratasain oikealla

3.1.1 Putkiston materiaalien vertailua

Tämän työn tekstissä ja esimerkeissä on putkisto oletettu teräsputkistoksi. Teoriaa voidaan soveltaa muillekin putkimateriaaleille. Kannattimet, voimat ja ilmiöt esiintyvät samalla tavalla materiaaliominaisuuksista riippumatta. Teräsputkien lineaariselle lämpölaajenemiskertoimelle käytetään arvoa $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$, joka on sama kuin putkisillan rakenneteräkselle, mikä yksinkertaistaa laskentaa.

Erilaisista materiaaliominaisuuksista seuraa joitakin eroja, mikä on huomioitu myös standardeissa. LM/KM-putkia (lujitemuovi- ja kestumuoviputkia) käsitellään standardissa SFS 5703. (SFS-Käsikirja 107, 2005) Näille putkille sallitaan teräsputkia suurempi taipuma, max 10 mm. Tästä huolimatta kannatinväli tulee teräsputkia pienemmäksi, sillä LM-putkissa käytettävän materiaalin kimmokerroin on vain noin 5% teräksen kimmokertoimesta. Tarkat ominaisuudet täytyy selvittää putkivalmistalta, sillä vaihtelu sekä kimmokertoimessa, tiheydessä että lineaarisessa lämpölaajenemiskertoimessa on erityyppisillä muoviputkilla suurta. Tyypillisesti lämpöpitenemä on LM-putkille noin 1,5-kertainen teräkseen nähden, mutta tietyillä erikoismuoveilla voi pitenemä olla jopa 5-kertainen tai suurempi.

Muoviputket ovat erityisesti edullisen hintansa ja keveytensä (edullinen asennus), pienen lämmönjohtavuutensa, sekä kemiallisen kestävyytensä vuoksi syrjäyttäneet teräsputkia monissa kohteissa, joissa käyttölämpötila on verrattain matala (korkeintaan 90 °C, mielellään alle 60 °C) (Kesti, 1992, s. 59)

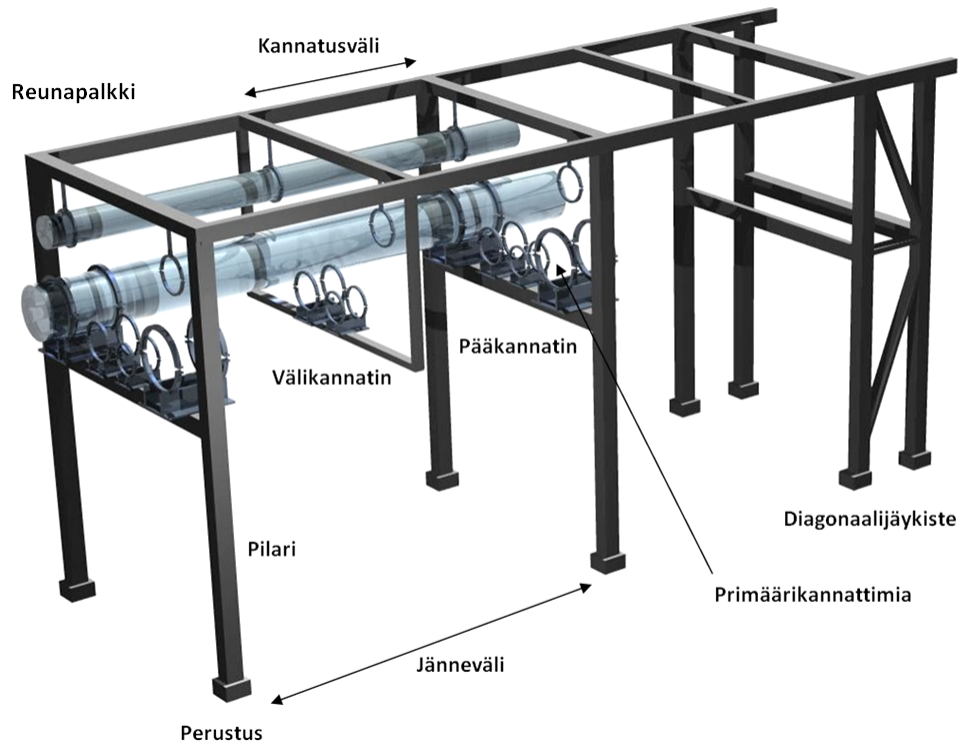
Putkistoissa käytettäviä muita materiaaleja ei käsitellä SFS-käsikirjan 107 standardeissa. On olemassa joitakin erikoiskohteita, joissa tarvitaan muita kuin edellä mainittuja materiaaleja. Standardissa SFS-EN 10216 käsitellään monia erilaisia ruostumattomia, haponkestäviä ja äärimmäisiä lämpötiloja kestäviä teräsputkistoja. Myös kupariputkille on omat standardinsa SFS-EN 12735, sekä erityisesti LVI-kupariputkille tarkoitettu standardi SFS-EN 1057, jotka kokonsa puolesta voivat tulla kyseeseen putkisillan kannalta merkittävänä putkistoina (suurin standardissa käsiteltävä putkikoko ulkohalkaisijaltaan 267 mm). Muista metalleista, kuten titaani, alumiini ja

nikkeli, sekä keraameista valmistettujen putkien osalta on materiaaliominaisuudet ja erityispiirteet selvitettävä putkien valmistajalta.

3.2 Putkisillat

Putkisilta on rakenne jonka ensisijainen tarkoitus on kannatella putkistoa paikasta toiseen jonkin esteen tai kulkutien ylitse. Putkisillalla voi olla muitakin tehtäviä kuten erilaisten kuljettimien tai kaapelihyllyjen tukeminen. Putkisiltaan kuuluu usein myös kulkutie, sillä putkistot laitteineen vaativat usein tarkkailua, huoltoa ja mahdollisuuksia erilaisten muutostöiden ja korjausten tekemiseen.

Putkisillan tyypillinen rakenne ja sillan osista käytettävät termit on esitetty oheisessa kuvassa (Kuva 2).



Kuva 2: Putkisillan osat

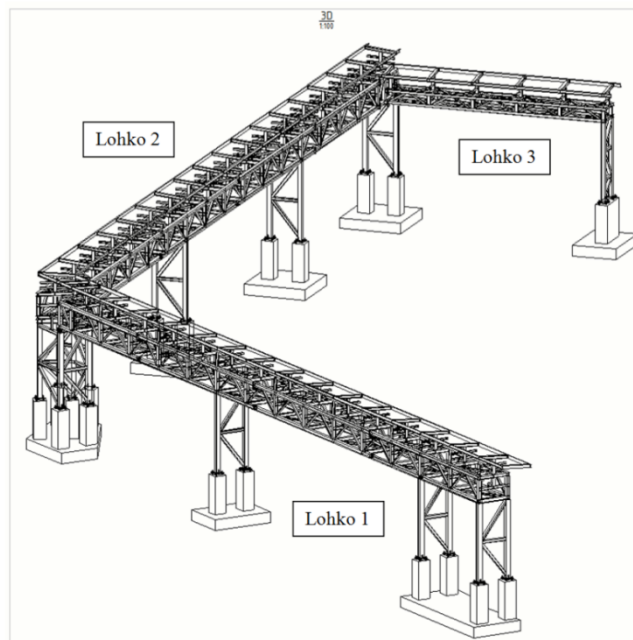
Kannateltavan putkiston määrä ja laatu vaikuttavat oleellisesti putkisillan rakenteeseen. Yksinkertaisimmillaan putkisilta voi olla pelkkä putkia kannatteleva palkki tai sarja pilareita, joiden päälle primäärikannattimet on aseteltu. Putkien määrän kasvaessa tarvitaan kapasiteetiltaan suurempia rakennetyyppejä, palkkeja, pilareita, portaalikehiä tai tukiristikoita. Sillassa voi olla lukuisia pilareita rinnakkain ja kerroksia voi olla useita.

Sillan putkistoa kannattelevista teräsrakenteista käytetään putkistosuunnittelussa nimitystä sekundäärikannatin. Primäärikannattimet ovat suoraan putkeen liittyviä valmisosia, joita esitellään tarkemmin luvussa 3.2.3 Putkiston primäärikannattimet.



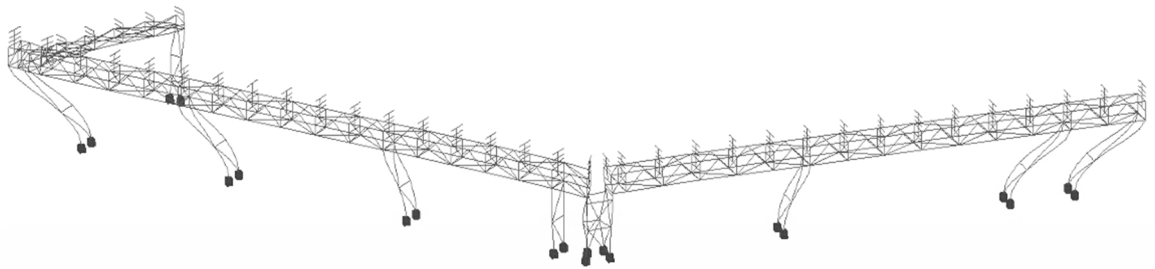
Kuva 3 Valokuvia putkisilloista: Talvivaara mining company, Sotkamo (vas.) ja Stora Enso, Langerbrugge (oik.)

Putkisilta koostuu tyypillisesti useista erillisistä peräkkäisistä sillan osista, joita kutsutaan lohkoiksi. Putket voivat vaatia kattamista tai kotelointia, mikä omalta osaltaan vaikuttaa putkisillan ulkonäköön ja rakenteiden valintaan. Kuvassa 4 on esitetty kolmesta lohkoista koostuva katettu putkisilta.



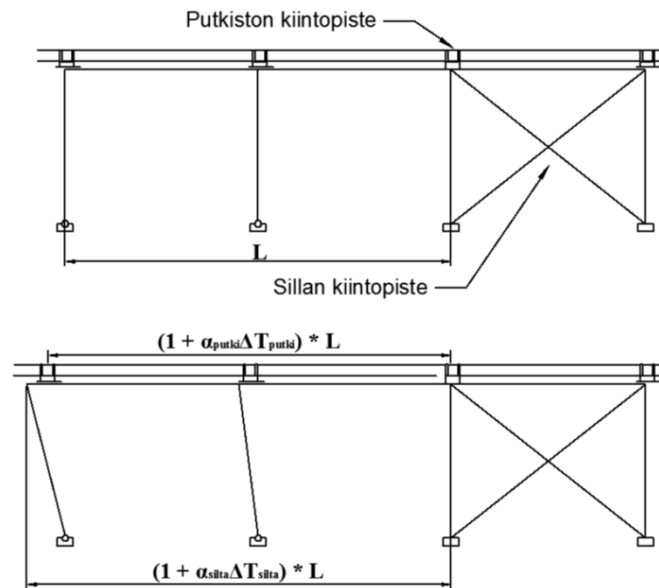
Kuva 4: Putkisillan rakenne

Siltojen pitkänomainen muoto pakottaa ottamaan sillan lämpöliikkeet huomioon sillan jäykistystä suunniteltaessa. Tällöin jokin siltalohkon piste valitaan kiintopisteeksi, jonka suhteen sillan liike on estetty. Sillan muille kiinnityksille on jätettävä mahdollisuus lämpöliikkeiden toteutumiseen sallimalla kiertyminen tai liukuminen sillan liitoksissa ilman että sillalle syntyy vaurioita tai liiallisia muodonmuutoksia. Kuvan 4 mukaisen sillan lohkojen 1 ja 2 kiintopisteenä toimii lohkoja yhdistävä ristikkopilari, jolloin lämpölaajenemisen katsotaan tapahtuvan tämän pisteen suhteen. Lohkon 3 kiintopisteenä on kiinnitys lohkon 2 kylkeen.



Kuva 5 Kiintopiste ja siltarakenteen lämpöliike

Myös putkilinjoilla on omat kiintopisteensä, joiden suhteen putken pitkittäissuuntainen liike on paikallisesti estetty. Mikäli suurin osa eri putkilinjojen kiintopisteistä on lähellä toisiaan on myös sillan kiintopiste edullista asettaa lähelle tätä putkiston kiintopistettä. On tyypillistä että putkiston lämpötila prosessissa pysyy samanlaisena ympäri vuoden, jolloin putkiston ja sillan keskinäinen lämpöliike-ero perustuu yksinomaan itse sillan lämpöliikkeisiin. Luvussa 4.3 esitettyjen havaintojen perusteella on sillan kiintopiste edullisinta asettaa lohkon keskelle.

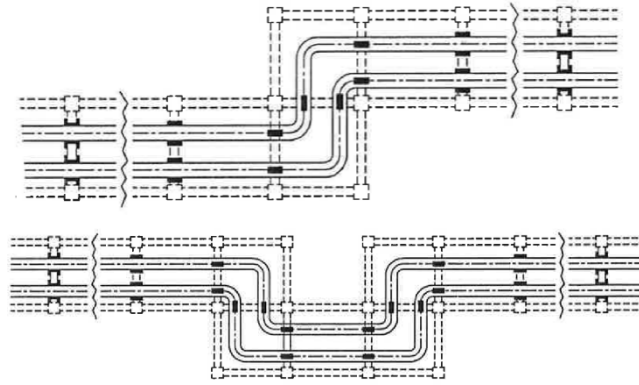


Kuva 6: Putkiston ja sillan kiintopisteet ja lämpöliike. (ylh. alkuperäinen tilanne)

3.2.1 Putkisillan rakennesuunnittelun erityiskysymyksiä

Teollisuusputkisto muodostaa kokonaisuuden, jossa ei yleensä tiiviysvaatimusten vuoksi ole mahdollista rakentaa liikuntasauvoja vaan lämpöpitenevä on kompensoitava siten että putkisto tekee mutkia, jotka lämpölaajenemisen yhteydessä kykenevät riittävään joustoon.

Yksinkertaisimmillaan joustava rakenne on L-kirjaimen muotoinen. Mikäli rakenteen vaatima jousto on liian suuri yhdelle L-muodolle tai mikäli muoto on laite- ja putkisijoittelun kannalta epätarkoituksenmukainen asetetaan L-muotoja peräkkäin tarvittava määrä. Kahdesta yhdistetystä L-muodosta syntyy joko U- tai Z- tyyppinen joustava muoto. (Henell, 2011, s. 43-45) Kyseiset muodot on esitetty oheisessa kuvassa 7. L-muotoja voidaan liittää peräkkäin useampiakin, eikä putkiston tarvitse pysyä yhdessä tasossa, joten L- muodossa toinen sakara voi aina osoittaa myös ylös- tai alaspäin.



Kuva 7: Lämpö pitenemän kompensointi Z- (ylh.) ja U (alh.) – mutkilla.

Putkiston vaatima muoto määrittelee myös putkisillan muodon. Putkisillan tulee seurata putkistoa siten että putkien riittävä tukeminen on mahdollista, lisäksi putkisillan tulee ohjata putkiston lämpöliikettä siten, että putkisto pitää suunnitellun muotonsa. Tämä tarkoittaa putkiston kannalta oikeanlaisten kannakkeiden asettamista oikeisiin paikkoihin. Kannakointia tarvitaan paitsi kannatteluun ja ohjaukseen, myös erilaisten värähtelyjen ja huojumisen vaimentamiseen. Putkisillan jako lohkoihin kannattaa yleensä tehdä kohdissa, joissa putkisto tekee käännöksen. Pitkillä yhdensuuntaisilla putkijaksoilla voidaan lohkojakoa joutua tekemään myös putkiston suorilla osilla.

Vaakasuurtaiset putkilinjat suunnitellaan viettäviksi siten, että kaasu- ja höyryputket ovat laskevia ja nesteputket nousevia virtaussuuntaan nähden. Tavallisesti viettokulma on välillä 1:200 - 1:500 (Korhonen, 2006, s. 40). Jos putkisilta sijaitsee osittain ulkona, tulisi putkiston alin kohta ja tyhjennykset olla mielummin sisä- kuin ulkotiloissa, varsinkin jos putket sisältävät jäätyvää nestettä.

3.2.2 Putkiston asettelu sillalle

Pienin putkisillan kannalta huomioitava putkikoko on DN25. (Kesti, 1991, s. 9) Tätä pienemmät putket kannatetaan suurempiin putkiin tai viedään omana ryhmänään esim. kaapelihyllyllä. Suurempiin putkiin kannatetut pienemmät putket huomioidaan painon lisänä suuremmille putkille. Kaapelihyllyllä kulkevien putkien aiheuttamat vaakavoimat voidaan yksinkertaisuuden vuoksi laskea kuten muidenkin putkien, mikäli kaapelihyllyn rakennetta ja hyllyn kannakointia siltarakenteeseen ei tarkemmin tunneta. Suurimmat tai suurimpia kuormituksia aiheuttavat putket tulisi sijoittaa mahdollisimman lähelle pilareita ja mahdollisimman alas, jolloin voimat siirtyvät lyhintä mahdollista tietä perustuksille.

Putkien liittymät ja toiminnalliset syyt määräävät usein putkien tarkan sijoittelun. Tärkeää on asettaa putket sillalle siten että niiden liikkeet sillalla ovat mahdollisia silloinkin, kun putkien lämpöliikkeet tapahtuvat eri tahdissa. Putkiston suositeltavat

välit on taulukoitu standardissa SFS 5364 teräsputkien osalta ja standardissa SFS 5399 muoviputkien osalta. (SFS-Käsikirja 107, 2005) Putkien asettelussa on huomioitava sillan mahdollinen laajennettavuus ilman putkien siirtelyä siten että esim. pilareita voidaan jatkaa ja palkkeja lisätä tarpeen vaatiessa.

Eri kokoisilla putkilla on eri mittainen kannatusväli, joten putket olisi sijoitettava niin että myös välikannakkeille tulevat kuormitukset olisivat mahdollisimman symmetrisiä. Kaikille putkille ei ole mahdollista saada optimaalista kannatusväliä. Suositeltavat kannatusvälit on taulukoitu standardissa SFS 5363. (SFS-Käsikirja 107, 2005) Eristetyille teräsputkille esitetty kannatusvälit ja putkien tiedot kaasu- ja nestetäytteisinä.

Taulukko 2 Kaasua tai nestettä sisältävien eristettyjen teräsputkien kannatusvälit L ja jännitykset σ lämpötilassa 120 °C

Table 2 Support distance L and stress σ for the insulated carbon steel pipes filled with liquid or gas at temperature 120 °C

Putki Pipe		Sisältö Medium									
		Kaasu $t = 120$ °C Gas $t = 120$ °C						Neste $t = 120$ °C Liquid $t = 120$ °C			
DN	Ulko halkaisija x seinämänpaksuus Outside diameter x wall thickness $d_e \times s$ mm	Jatkuva kuormitus Continuous load q N/m	Kannatus tapa Support way				Jatkuva kuormitus Continuous load q N/m	Kannatus tapa Support way			
			Vapaa tuenta Freely supported		Kiinteä tuenta Stationarily supported			Vapaa tuenta Freely supported		Kiinteä tuenta Stationarily supported	
			L m	σ N/mm ²	L m	σ N/mm ²	L m	σ N/mm ²	L m	σ N/mm ²	L m
10	17,2 x 1,8	30	1,4	25,3	2,1	37,8	31	1,4	25,9	2,1	38,6
15	21,3 x 2	34	1,7	22,4	2,5	33,5	36	1,6	23,2	2,5	34,6
20	26,9 x 2	38	2,0	20,6	2,9	30,7	42	1,9	21,6	2,9	32,3
25	33,7 x 2	49	2,2	20,5	3,3	30,6	56	2,1	21,9	3,2	32,6
32	42,4 x 2,3	59	2,6	18,4	3,9	27,5	70	2,5	20,1	3,7	29,9
40	48,3 x 2,3	64	2,8	17,8	4,2	26,6	78	2,7	19,8	4,0	29,5
50	60,3 x 2,3	74	3,9	23,9	5,8	35,7	98	3,6	27,6	5,4	41,1
65	76,1 x 2,6	109	4,3	24,2	6,4	36,1	148	4,0	28,2	6,0	42,0
80	88,9 x 2,9	128	4,8	22,9	7,2	34,1	181	4,4	27,2	6,6	40,6
100	114,3 x 3,2	162	5,6	21,5	8,4	32,1	251	5,0	26,8	7,5	40,0
125	139,7 x 3,6	203	6,4	20,5	9,5	30,5	339	5,6	26,4	8,4	39,4
150	168,3 x 4	277	6,9	20,6	10,4	30,7	474	6,1	26,9	9,1	40,2
200	219,1 x 4,5	372	8,1	19,6	12,2	29,2	711	6,9	27,1	10,3	40,4
250	273 x 5	483	9,2	18,9	13,8	28,2	1015	7,7	27,5	11,5	40,9
300	323,9 x 5,6	646	10,0	19,0	15,0	28,3	1400	8,3	27,9	12,4	41,6
350	355,6 x 5,6	703	10,6	18,8	15,8	28,1	1613	8,6	28,5	12,8	42,6
400	406,4 x 6,3	862	11,4	18,4	17,1	27,5	2056	9,2	28,4	13,7	42,4
500	508 x 6,3	1062	12,8	18,2	19,2	27,1	2947	10,0	30,3	14,9	45,2
600	610 x 6,3	1264	14,1	18,0	21,1	26,9	4005	10,6	32,1	15,8	47,9
700	711 x 7,1	1595	15,4	17,7	23,0	26,4	5333	11,4	32,3	17,0	48,2
800	813 x 8	1994	16,6	17,4	24,8	26,0	6881	12,2	32,3	18,2	48,2
900	914 x 10	2809	17,6	17,5	26,3	26,0	8958	13,2	31,2	19,7	46,5
1000	1016 x 10	3112	18,6	17,4	27,8	25,9	10743	13,6	32,3	20,4	48,2
1200	1200 x 12,5	4442	20,6	17,0	30,8	25,3	15427	15,1	31,6	22,6	47,2

Kuva 8: Standardin SFS 5363 taulukko 2. Eristettyjen teräsputkien kannatusvälit

Kyseisen standardin kannatusvälien arvot perustuvat putkien sallittuun taipumaan, joka on 3 mm, kun putken koko on DN50 tai pienempi, ja sitä suuremmilla putkilla 6 mm. Käytettävien primääräkannattimien kestävyys voi kuitenkin vaatia käyttämään standardia pienempiä kannatusvälejä. Lisäksi putkien kannatusväli on tarpeellista

tarkistaa mikäli putkessa kuljetettavan aineen tiheys, putkien ominaisuudet, putkien käyttölämpötila tai eristeiden laatu eroavat standardissa esitetyistä oletusarvoista.

Standardissa esitetään yhtälöt vapaasti ja kiinteästi tuetulle tapaukselle. Yhtälöt perustuvat klassisessa Euler-Bernoullin palkkiteoriassa esitettyyn taipuman yhtälöön:

$$\text{Vapaasti tuettu putki:} \quad L = \sqrt[4]{\frac{384}{5q}} EI v_{sall} \quad (3.1)$$

$$\text{Kiinteästi tuettu putki:} \quad L = \sqrt[4]{\frac{384}{q}} EI v_{sall} \quad (3.2)$$

Yhtälöissä 3.1 ja 3.2:

Kannatusväli L , mm

Kimmomoduuli E , N/mm²

Putken jäyhyysmomentti I , mm⁴

Viivakuorma q , N/mm

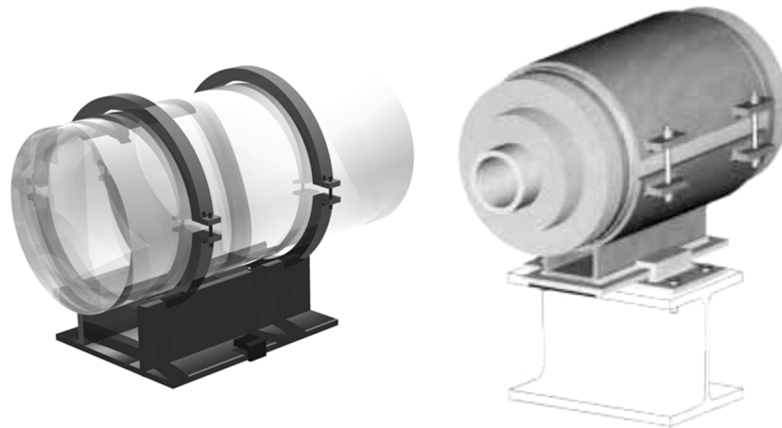
Sallittu taipuma v_{sall} , mm

Kiinteästi tuetulle putkelle sallittu kannatusväli on siten noin 1,5-kertainen vapaasti tuettuun verrattuna. Nämä arvot muodostavat ehdottomat ylä- ja alarajat vaaditulle kannatusvälille. Putkisankojen tuennan ei voida olettaa jäykistävän putkea merkittävästi, vaan putki tulee tulkita moniaukkoiseksi niveltuetuksi palkiksi. Käytännölliset kannatusvälit eivät useinkaan ole tasaiset ja putkiston muoto käännöksissä tekee käsin laskennasta hyvin työlästä. Mikäli putken taipuman laskentaan on tarvetta, eikä putkiston kannatusvälejä ole määritetty putkistosuunnittelun yhteydessä, on taipuman laskeminen syytä suorittaa FEM-ohjelmiston avulla.

3.2.3 Putkiston primäärικannattimet

Putkiston kannattimet voidaan toimintansa perusteella jakaa:

1. Kiinteisiin kannattimiin (kiintopisteisiin), jotka estävät putken liikkeen kaikkiin suuntiin
2. Ohjattuihin liukuihin, jotka sallivat putken pituussuuntaisen liikkeen
3. Vapaisiin liukuihin, jotka sallivat putken liikkeen sekä pituus- että poikittaissuuntaan.
4. Riippukannattimiin.

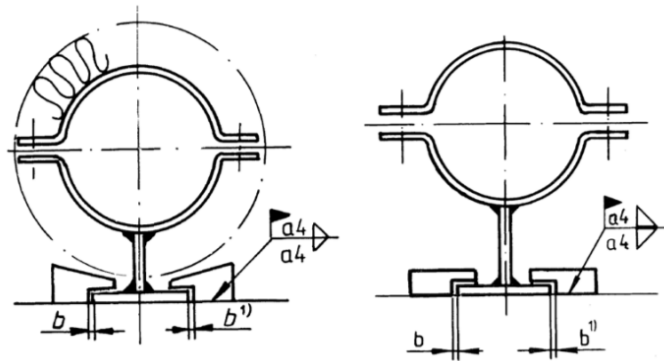


Kuva 9: Liukukannatin, kynsiohjaus (eristetty versio oikealla)

Tyypillinen putkiston kannatintyyppi on kuvassa 9 esitetty liukukannatin. Liukukannatin on itsessään vapaa liuku. Jos sivuttaisliike on estetty kuten kuvassa näkyvällä kynsiohjauksella, on kannake ohjattu liuku ja estopalalla varustettuna tai alustaansa pultattuna se on kiinteä kannake. Liukukannattimia on useita tyyppejä, joita on esitelty SFS-käsikirjassa 107 (standardit 5373-5378, 5858-5860, 5886-5890) (2005)

Liukukannattimien suunnittelussa tulee huomioida kannattimen riittävä pituus, jottei se sillan ja putken erilaisten lämpöliikkeiden toteutuessa pääse putoamaan kannatinta tukevan palkin päältä.

Kynsiohjaimia standardeissa esitetään kahta tyyppiä: Kevyt kynsiohjain SFS 5366 ja raskas kynsiohjain SFS 5367. Kynsiohjaimet hitsataan putkisiltarakenteeseen usein jo valmiiksi konepajalla. Kuvassa 10 esitetty välys kynsien ja kannattimen välillä määritellään projektikohtaisesti. Tyypillisesti välys on alle DN200 kokoisilla putkilla 2-3 mm ja DN200-600 kokoisilla 3-5 mm. Tätä suurempien putkien ohjaamiseen käytetään yleensä järeämpiä erikseen mitoitettuja teräsprofiileja, joissa välyksen mitta on 5 mm.



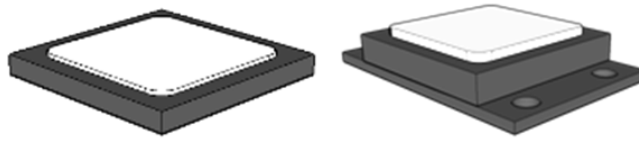
Kuva 10: Kevyt kynsiohjain SFS 5366 (vas.) ja raskas kynsiohjain SFS 5367.

Kannattimissa suoraan putkeen kiinni tulevaa osaa kutsutaan putkisangaksi ja sen valmistukseen on SFS-käsikirja 107:ssä omat standardinsa. U-sankaa (SFS 5369, kuva 11) käytetään yksinään putken kiinteänä kannakkeena tai ohjaamiseen. Ohjauksen järjestäminen U-sangalla voi vaurioittaa putken pintaa, lisäksi liukukannakkeiden yleiset lepokitkan arvot eivät välttämättä toteudu, mikäli putken alustan ominaisuuksiin ei kiinnitetä riittävästi huomiota. U-sankaa käytetäänkin yleensä varsin pienien putkien kannattamiseen.



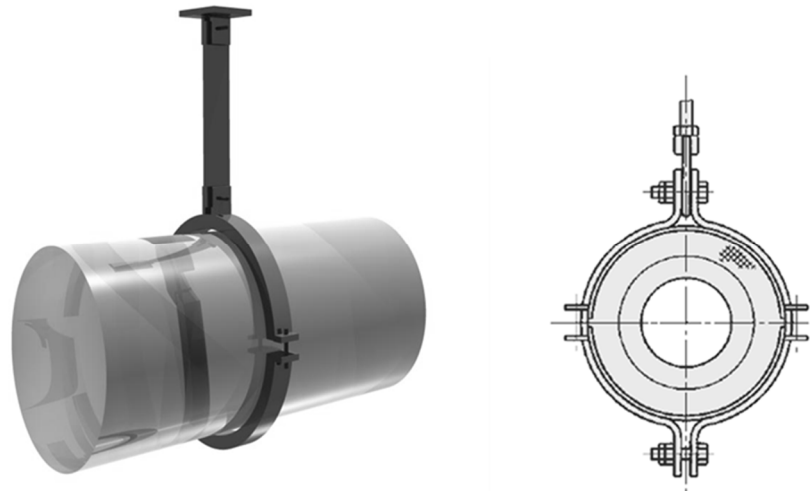
Kuva 11: U-sanka kannatin

Liukukannattimien (ohjattu ja ohjaamaton liukukannatin, sekä U-sanka) tapauksessa primäärikannakkeen tai putken liukumista alustalla vastustaa kitkavoima, joka välittää samalla liikkeen suuntaista kuormitusta alla olevalle rakenteelle. Kitkavoiman pienentämiseksi liukukannattimen tai putken alla voidaan käyttää kitkaa pienentävää aluslevyä. Aluslevyn pintamateriaalina käytetään yleensä polytetrafluorieteeniä (PTFE, kauppanimi teflon) kitkaominaisuuksiensa ja pitkäaikaiskestävyytensä ansiosta.



Kuva 12: PTFE aluslevy, hitsattava (vas.) ja pulttikiinnitteinen versio

PTFEn kitkakerroin teräksen kanssa on pienin tunnetuista materiaaleista, valmistajan mukaan 0,06 - 0,1. Standardissa SFS 5361 esitetään arvo 0,15. (SFS-Käsikirja 107, 2005) Levyn vastinparina tulee aina käyttää ruostumatonta terästä. PTFE levyn toiminnallinen käyttölämpötila saa olla korkeintaan 150 °C - lämpötilan ylittyminen voidaan yleensä estää luotettavasti eristämällä. On mahdollista käyttää myös huomattavasti suurempia lämpötiloja kestäviä (600 °C) keraamisia aluslevyjä. Keraamisten levyjen kanssa voidaan käyttää myös hiiliteräksiä.



Kuva 13: Riippukannatin, leikkauskuva eristetystä riippukannattimesta oikealla

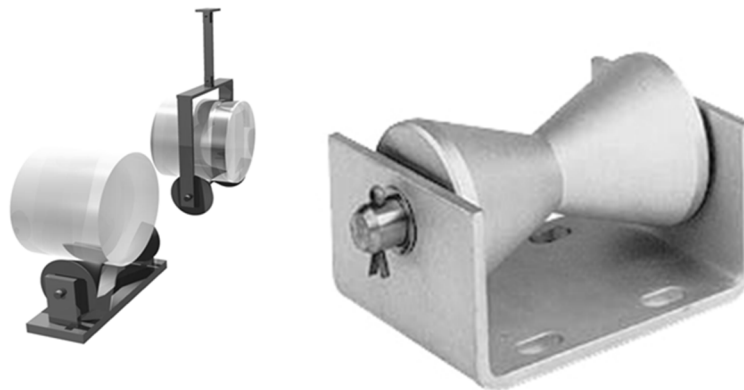
Riippukannatin on kannatintyyppi, jota SFS-käsikirjassa käsittelevät standardit 5361, 5362 ja 5380-5393. Riippukannattimessa putkisanka roikkuu ripustustangossa, joka ei estä putken vaakasuuntaisia liikkeitä. Toisin kuin liukukannakkeiden tapauksessa ei kitka ole osallisena voiman siirrossa, putken liikkeessä riippukannatin aiheuttaa kuitenkin kiinnityspisteeseensä vaakasuoraa voimaa, joka on riippuvainen paitsi putken siirtymästä, myös ripustusvarren pituudesta.

Riippukannattimessa voi olla ripustusosan ja putken välillä myös liukumismahdollisuus. Yleensä putken ja riippukannattimen liitosta voidaan kuitenkin perustellusti käsitellä kiinteänä liitoksena, sillä riippukannattimessa syntyvät pienet vaakavoimat eivät ylitä liukukannakkeen lepokitkaa.

Riippukannakoitua putkea voidaan ohjata. Tällöin käytetään usein sivulta putkisankaan kohdistuvaa kynsiohjausta. Ohjaus vähentää riippukannakkeen tapauksessa ongelmallista putkiston värähtelyä ja heilumista. (Hiltunen, 2012)

Kiinteän riippukannakkeen aiheuttama vaakasuora kuormitus riippuu putkistossa tapahtuvista kokonaissiirtymästä, joiden laskeminen on liukukannattimissa tapahtuvan kitkan kehittymisen ja laukeamisen aiheuttamaa systeemiä yksinkertaisempaa. Riippukannattimella syntyvät vaakasuorat kuormitukset ovat kertaluokkaa liukukannattimien vastaavia pienempiä, varsinkin mikäli ripustustanko on kohtuullisen pitkä ja sillan ja putken väliset lämpöliikkeet maltillisia. Riippukannakkeen aiheuttama vaakasuuntainen voima syntyy kuitenkin korkeammalle, joka aiheuttaa suuremman momentin perustuksille. Putkisillalla putkien päälle valuu kattamattomana riippukannattinta pitkin vettä, mikä tulee huomioda varsinkin eristettyjen putkien tapauksessa. (Kesti, 1991, s. 15)

Riippukannattimen lisäosia ovat putken pystysuuntaiset liikkeet salliva jousikannake, jossa kannatusvoima muuttuu putken pystysuuntaisen liikkeen myötä ja vakiovoimakannake, jossa kannatusvoima säilyy vakiona putken pystysuuntaisesta liikkeestä huolimatta. Näiden lisäosien tarkoitus on estää putkiston painon siirtyminen väärin paikkoihin, kuten putkien keskinäisiin liitoksiin.



Kuva 14: Sangaton rullakannatin

Sangaton rullakannatin on kannatintyyppi, jossa putki liikkuu suoraan tiimalasia muistuttavan pyörivän rullan päällä. Rullakannattimia ei käsitellä SFS-standardeissa. Rullakannatin on aina ohjattu liuku, lukuunottamatta kannaketyyppejä, jossa rullaosa on kiinnitetty riippukannattimeen.

Sangaton kannake ei putken pintaan kohdistuvan rasituksen vuoksi sovellu muoviputkien tai ohutseinäisten teräsputkien (esim. pneumaattiset putket) kanssa käytettäviksi. Sangatonta rullakannaketta käytetään tyypillisesti petrokemianteollisuudessa.



Kuva 15: Sangallinen rullakannatin (Lisega, tyyppi 51). Vasemmalla rullalajusta ja oikealla putkisangallinen satulaosa

Sangallinen rullakannake on kannatintyyppi, jossa putkeen kiinnitetty putkisangallinen satulaosa liikkuu rullalajustojen päällä. Rullalajustoja asetetaan satulan alle tarvittava määrä siten ettei rullien sallittu kuormitus ylity ja toisaalta ettei satulaosa pääse putoamaan rullien päältä. SFS-standardeissa ei käsitellä sangallista rullakannaketta. Valmistajan ilmoittamien arvojen mukaan rullakannakkeisiin syntyvät liikkeen suuntaiset rullakittavoimat ovat korkeintaan 4% kannakkeiden pystysuorasta kuormituksesta, mikä vastaa kitkakerrointa 0,04. (Lisega, 2012)

3.2.4 Kitkavoimalle käytetyt mitoitusarvot

SFS-käsikirjan 107 standardissa SFS 5361 annetaan liukukannattimen lepokitkakertoimelle μ arvoja erilaisissa olosuhteissa. Hyvissä olosuhteissa käytetään arvoa 0,3. Putkistosuunnittelussa ja jännityslaskennassa käytettävän standardin SFS-EN 13480-3 (2013) mukaan kitkakertoimena tulee käyttää aina 0,3 ellei pienemmän arvon käytölle ole esittää perusteita.

Edellä mainitut standardit eivät anna tarkempaa ohjetta miten kitkakerrointa tulisi käyttää rakennesuunnittelussa. Tyypillinen ja yksinkertaisin tulkinta on laskea mitoittava kitkavoima suurimmasta kannattimeen laskennallisesti syntyvästä pystykuormasta. Tapauksissa joissa rakenneosaa kuormittaa useampi kuin yhdeltä kannattimelta tuleva kitkavoima, lasketaan nämä kaikki voimat yhteen kyseistä rakenneosaa mitoittaessa. Yksittäiseltä kannattimelta voima siirtyy kannatinpalkille. Useammalta kannattimelta kertyy voimaa reunapalkkeille, jolta voima siirtyy edelleen jäykisteille, sekä jäykistykseen liittyville perustuksille. (Ks. kuva 2)

Ohjetta tämän kokonaiskitkavoiman määrittelystä ei sisälly eurokoodeihin. Putkisiltoja rakentavat tai suunnittelevat yhtiöt, teollisuusrakentamista edustavat yhdistykset ja aiheetta käsittelevät tutkijat ovat kirjoittaneet putkisiltojen suunnitteluohjeita, joissa kitkavoiman suuruutta ja useammalta kannattimelta kertyvien voimien summaa käsitellään. Tätä työtä varten tutkituissa lukuisissa ohjeissa ja

haastatteluissa ei voiman kumuloitumiseen johtavaa tutkimusta, periaatetta tai teoreettista perustelua esitetä. Ohjeista löytyy sanallisia huomioita joiden perusteella päädytään täyttämään summaamista pienempiin arvoihin. Nämä huomiot voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- Voimien kumoutuminen (RTM Engineering, 2012; Drake, 2012).
- Epätodennäköisyys putkien samanaikaiselle lämpöliikkeelle (Drake/Walter, 2010).
- Kitkavoiman purkautuminen (Abu-Adas, 2002; American Petroleum Industry, 2006).

Lämpöliikettä jarruttavan kitkavoiman vastavoimana syntyy putken kiintopisteelle vastakkaissuuntainen kiinnitykseen kohdistuva ankkurivoima. Tapauksissa joissa putki on kiinnitetty samaan siltalohkoon, jonka päällä myös liukukannattimet liukuvat voimat kumoavat toisensa lohkon sisällä, jolloin voimilla on vain paikallisia vaikutuksia, eikä perustuksille vietävää resultanttia synny. Tätä käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.4.

Kumoutumisesta huolimatta ohjeet esittävät reunapalkeille, jäykistykselle ja perustuksille käytettäväksi mm. 5% putkiston kokonaispainoa vastaavaa vaakasuuntaista kitkakuormaa. (Abu-Adas, 2002; American Petroleum Industry, 2006) Syytä tämän voiman suuruuteen ei ohjeissa esitetä. Kumoutumistapauksessa tämän voiman tulisi hävitä jäykistuksen ja perustusten osalta kokonaan, mutta reunapalkkien osalta voima vaikuttaisi täysimääräisenä, eli paikallisesti putkiston kiintopisteen vieressä 30% kaikista reunapalkkiin vaikuttavista putkien tukireaktioista, mikäli käytetään kitkakertoimen arvona 0,3.

Epätodennäköisyys putkien samanaikaiselle liukumiselle perustuu olettamukseen että eri putkilinjojen käyttö aloitetaan eri aikoina ja putkissa tapahtuvat lämpötilamuutokset eivät tapahdu samanaikaisesti samaan suuntaan. Saudi Aramcon ohjeessa (Abu-Adas, 2002) todennäköisyysajattelu ilmenee ohjeessa siten, että yksittäiselle liukukannattimille tukevalle palkille kohdistuva kitkavoima usealta liukukannattimelta on joko 30% suurimman putken tukivoimasta tai 10% kaikkien putkien tukivoimasta sen mukaan kumpi voimista on suurempi. Walsworthin artikkelissa (Drake/Walter, 2010) ajatus on sama, suurimman putken kitkavoimaksi käytetään vain suurempaa arvoa 40%.

Todennäköisyysajatus näin ymmärrettynä ei ota huomioon ympäristön lämpötilanmuutosta. Varsinkin eristetyissä putkissa lämpötila pysyy hyvin tasaisena prosessin käydessä. Ilmiöt jotka vaikuttavat sillan ja putkien välillä toteutuvat osittain samalla tavalla riippumatta siitä tapahtuuko lämpöliike putkissa vai siltarakenteessa. Mikäli sillan kiintopiste sijaitsee lohkon keskellä siltarakenteen lämpötilan vaihtelusta aiheutuvat voimat kumoavat toisensa (käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.4) Mikäli kiintopiste on lohkon päässä, ympäristön lämpötilan muuttuessa putkien ja sillan

keskinäinen lämpöliike tapahtuu samanaikaisesti samaan suuntaan koko lohossa. Putkisillan lämpötila muuttuu jo lämpötilan normaalin vuorokausivaihtelun vuoksi ja usein vielä paljon nopeammin esimerkiksi auringonpaisteen tai sateen vaikutuksesta. (SFS-EN 1991-1-5, 2009)

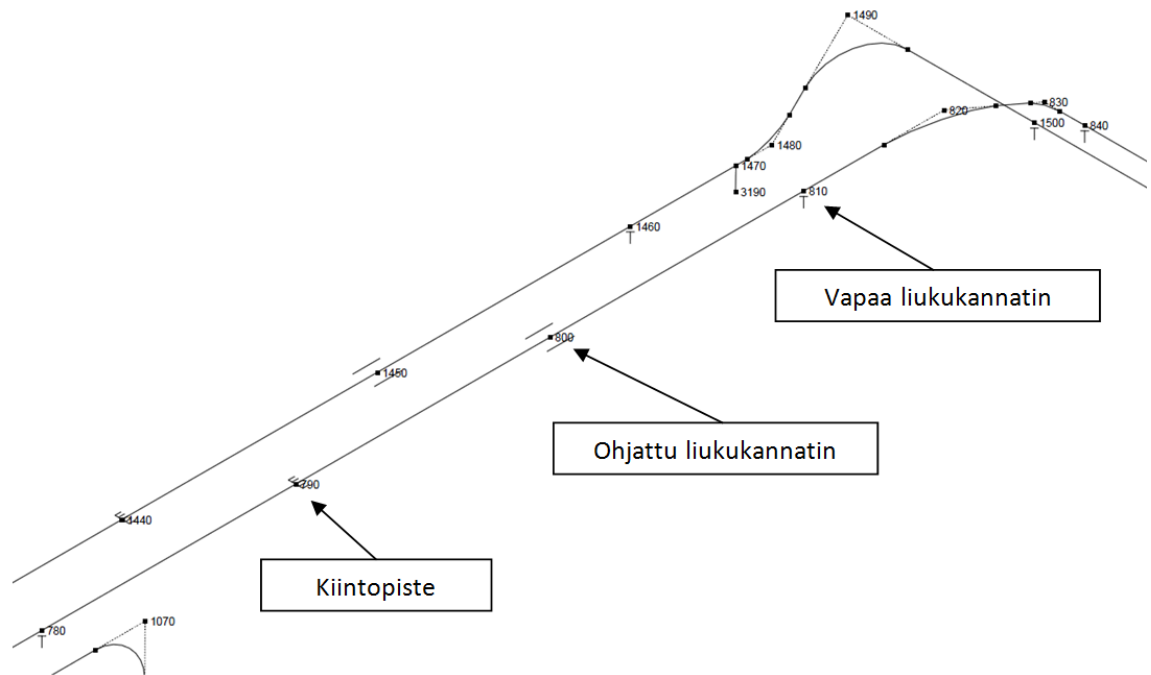
Todennäköisyys voi tulla kyseeseen tapauksissa joissa kaikki putkilinjat eivät lämpene tai jäähy samanaikaisesti tai eivät ole samanaikaisesti käytössä tai mikäli putket eivät ole yleensä täynnä. Todennäköisyyden laskemiseksi tarvitaan tietoa kyseessä olevan prosessin kulusta, eikä yleispäteviä sääntöjä voida tällaiselle todennäköisyydelle antaa. Mikäli putkistot ovat kaasuputkia joille tehdään vesipainekoe vain ennen käyttöönottoa, on perusteltua käyttää todellisia käytön aikaisia kaasun painosta aiheutuvia kuormia.

Kitkavoimien purkautuminen mainitaan erityisesti maanjäristys- ja tuulikuormien yhteenlaskussa kitkavoimien kanssa (Abu-Adas, 2002). Maanjäristystilanteessa, sekä voimakkaan tuulikuorman vaikuttaessa sillassa tapahtuu tärinää ja liikettä, jolloin kitkavoimat purkautuvat ja lämpöliikkeet pääsevät toteutumaan esteettä. Ohjeissa esitetään ettei kitkavoimaa ja näitä kuormia siksi tulisi laskea keskenään yhteen. Oletus on uskottava ja sitä voidaan varmuudella käyttää myös esimerkiksi onnettomuuskuormien yhteydessä. Tuulikuorman tapauksessa jää epäselväksi olisiko tarpeen yhdistelyssä laskea jonkinlainen osa tuulikuorman maksimiarvosta yhteen kitkakuorman kanssa, sillä matalilla tuulenpaineen arvoilla kitkavoiman häviäminen ei ole yhtä varmaa.

3.3 Putkiston joustoanalyysi

Putkistosuunnittelija tekee putkiston joustoanalyysin standardin SFS-EN 13480-3 (2013) mukaisesti. Analyysi toteutetaan FEM-laskentana, jossa putkistossa vaikuttaa putkiston painosta, lämpökuormista ja putkiston sisäisestä paineesta syntyviä voimia. Joustoanalyysillä varmistetaan etteivät voimat aiheuta putkistossa standardin vaatimuksia suurempia jännityksiä. Analyysin tuloksena saadaan myös kannakevoimat ja momentit, jotka välittyvät luvussa 3.2.3 esitettyjen kannattimien välityksellä siltaa tukevalle rakenteelle, kuten tässä tapauksessa putkisillalle. Joustoanalyysissä käsitellään yleensä useita eri ajotilanteita ja kuormitustapauksia, joista rakennesuunnittelijan tulee tarkastella sillan kestävyys kannalta määräävin tai määräävimät tapaukset.

Kannakkeiden sijaintitiedot on esitetty solmukuvassa, jossa eri tyyppiset putkikannattimet on esitetty erilaisilla tunnuksilla. Putkisillan tapauksessa yleisimmät kannattimet ovat vapaaliuku, ohjattu liuku ja putkiston kiintopiste. Oheisessa kuvassa on esitetty osa putkisillan putkiston solmukuvasta ja kannattimien tunnukset. Solmut joissa ei ole kannatinmerkintää ovat jännityslaskentaa varten, eikä näissä kohdissa ole kannatinta.



Kuva 16: Solmukuva ja kannattimien tunnuksset

Joustoanalyysin tuloksissa edellämainitut kannatintyyppit välittävät voimia siten, että vapaa liuku välittää pystysuuntaista kuormaa ja vaakasuuntaista kitkavoimaa. Ohjattu liuku välittää pystysuoran kuorman ja putken pituussuuntaisen kitkan lisäksi poikittaissuuntaista voimaa, jota kutsutaan myös ohjausvoimaksi. Kiintopisteellä esiintyy kolmea erisuuntaista voimaa ja momenttia.

Kuvassa 17 on esitetty solmukuormat edellisen kuvan kolmelle erityyppiselle kannattimelle. Taulukon arvoista voidaan huomata, että joustolaskennassa käytetään kitkakertoa 0,3. Vapaalle liu'ulle kitkavoima on laskettu pystysuuntaisen kuorman ja kitkakertoimen tulona. Ohjatulla liu'ulla ohjausvoima on pystysuuntaista kuormaa suurempi ja kitkavoima on laskettu ohjausvoiman ja kitkakertoimen tulona. Kitka vaikuttaa tässä siis ohjainkynnen ja putkikannattimen välisenä kitkavoimana. Kiintopisteen putkikannatin oletetaan mallissa jäykäksi tueksi ja siinä vaikuttavat tukireaktiot määrittyvät FEM-laskennan perusteella.

Support load summary for limit stop at node 810		
Load combination	Load (N)	Friction (N)
Sustained	-13783	536
Operating1	-31267	9380
Hydrotest	-17687	571
Maximum	-13783	9380
Minimum	-31267	536

Support load summary for guide at node 800			
Load combination	fx (N)	fy (N)	fz (N)
Sustained	0	0	-4006
Operating1	9921	33072	0
Hydrotest	0	0	-6888
Maximum	9921	33072	0
Minimum	0	0	-6888

Support load summary for anchor at node 790						
Load combination	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)
Sustained	0	-532	-14711	590	-13576	-1729
Operating1	9920	10905	-7817	1359	-24667	-105478
Hydrotest	0	-784	-18437	971	-16246	-2228
Maximum	9920	10905	-7817	1359	-13576	-1729
Minimum	0	-784	-18437	590	-24667	-105478

Kuva 17: Solmukuormia erityyppisille kannattimille

Yllä kuvattujen voimien laskentaa käsitellään tarkemmin luvussa 4. Putkiston joustoanalyysi ei ota huomioon kannattimien joustamista, joka vaikuttaa todellisiin putkisiltaan kohdistuviin putkikuormiin. Liukukannattimien ei katsota joustoanalyysissä välittävän momenttia. Putkiston joustoanalyysin tuloksina esitetyt kitkavoima sekä ohjatulle, että vapaalle liulle ei sisällä tietoa voiman suunnasta. Esimerkiksi yllä olevan kuvan solmun 800 kitkavoima (f_x (N)) voi olla positiivinen tai negatiivinen.

Joustoanalyysin tulkinta vaatii luvussa 4 esitettyjen voimien määrittämisperusteiden tuntemista. Joustoanalyysin antamien kannakevoimien ja momenttien käyttöön putkisillan kuormana liittyviä ongelmia käsitellään kappaleessa 4.2.1.

4 LASKENNALLINEN TUTKIMUS

Tässä luvussa tutkitaan putkiston lämpöliikkeestä aiheuvia putkisiltaan kohdistuvia kuormituksia sekä liuku- että riippukannattimien tapauksessa. Vaakakuormien laskemiseksi on tunnettava kannattimeen kohdistuva pystykuormitus. Tarkastellaan liukukannattimien kitkasta syntyvää putkiston suuntaista vaakakuormaa, putkiston poikittaista voimaa. Luvussa tutkitaan putkikannattimien ja siltarakenteen joustamista, jouston vaikutusta voimien suuruuteen, sekä käsitellään putkistosuunnittelijan tekemän joustoanalyysin käyttämistä putkisillan kuormitusta määriteltäessä. Myös muita kuormituksen suuruuteen vaikuttavia ilmiöitä ja rakenneratkaisuja esitellään ja tarkastellaan lämpöliikkeestä aiheutuvan kuormituksen eroa moniin muihin rakennetta kuormittaviin voimiin.

4.1 Kannattimilta siirtyvät kuormat

Putkiston aiheuttama kuormitus sillalle välittyy putkikannattimien välityksellä.

4.1.1 Kannattimen pystykuormitus

Putkiston pystykuorma yksittäiselle kannattimelle saadaan kannatusvälin ja putken pituuskuorman tulona. Putken pituuskuorma riippuu putken omasta painosta, sisällön painosta, eristeen painosta, sekä ulkoisesta kuormasta, joka voi aiheutua lumesta tai jään kertymisestä putken pinnalle:

$$F_z = L_k((A_p\rho_p + A_v\rho_v + A_e\rho_e)g + q_s + q_i) \quad (4.1)$$

<i>Pystysuora kuorma</i>	F_z, N
<i>Kannatusväli</i>	L_k, m
<i>Poikkileikkauksen ala</i>	A, m^2
<i>Tiheys</i>	$\rho \text{ (kg / m}^3\text{)}$
<i>Putoamiskiihtyvyys</i>	$g, m/s^2$
<i>Viivakuorma lumesta</i>	$q_s, N/m$
<i>Viivakuorma jäältä</i>	$q_i, N/m$

Erikokoisten putkien halkaisijoita ja seinämäpaksuuksia on taulukoitu kappaleen 3.2.2 kuvassa 8. Näiden perusteella putken leikkauspinta-ala ja virtausala voidaan laskea. Nesteen tiheydeksi voidaan olettaa veden tiheys, ellei putkessa ole tarkoitus kuljettaa oleellisesti vettä raskaampaa ainetta. Jos sisältö on vettä kevyempää on veden tiheyden käyttö silti usein perusteltua yksittäisen kannattimen kohdalla, sillä putkistolle tehdään useimmiten vesipainekoe ennen käyttöönottoa. (Henell, 2011, s. 16) Useiden putkien yhteenlasketun pystykuorman vaikutuksessa voi silti käyttää todellista kuormitusta, sillä vesipainekoe on poikkeustilanne, jota ei suoriteta samanaikaisesti useille putkilinjoille.

Eristekerroksen paksuus valitaan SFS 3977 taulukosta B.5. Eristyskerroksen tarkan paksuuden tunteminen ei ole pystykuorman määrittelyn kannalta olennaista, sillä eristeen osuus kuormasta on varsin vähäinen. Käytettyjen materiaalien tiheyksiä on taulukoitu ohessa:

Taulukko 4.1. Materiaalien tiheyksiä.

Materiaali	Tiheys ρ (kg / m³)
Hiiliteräs	7850
Ruostumaton teräs	7900
Haponkestävä teräs	8000
Muoviputket	1450
Eriste	90
Vesi	1000

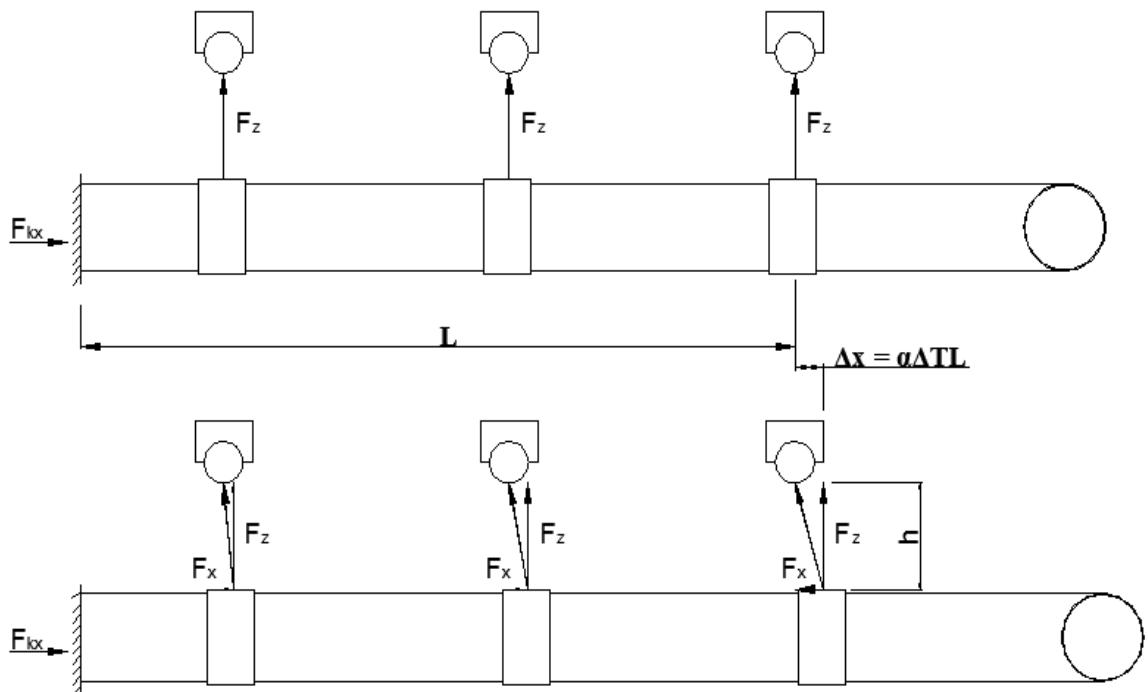
Putkeen kohdistuvaa lumikuormasta aiheutuvaa kuormituslisää käsitellään Eurokoodin osassa SFS-EN 1991-1-3 lumikuormat (2004) ja jään kertymisestä aiheutuvaa kuormaa voidaan tarkastella standardin ISO 12494 ”Atmospheric icing of structures” (2001) mukaisesti. Katetuilla silloilla lumikuorma kertyy sillan katolle, eikä aiheuta lisäystä siten putkien pystykuormitukseen. Kattamattomalla sillalla lumikuormalla voi olla vaikutusta putkiston pystykuormaan, erityisesti mikäli putkia on runsaasti lähekkäin, jolloin ne muodostavat yhtenäisen putkimaton, jonka päälle lumi pääsee kinostumaan.

Putkistossa voi olla erilaisia laitteita, venttiilejä, tasaimia, pumppuja, mittareita tai muita laitteita, jotka aiheuttavat huomattavia pystysuuntaisia pistekuormia putkelle ja kannattimille. Nämä laitteet on sijoitettava lähelle putkikannattimia, jotta rasitus putkelle olisi mahdollisimman pieni. Jos kuorma on suuri tai se joudutaan sijoittamaan

kauas kannattimelta, täytyy erityisesti putken taipumaraja laskea uudelleen ja tarkastaa joudutaanko putken kannatinväliä tältä kohdalta pienentämään.

4.1.2 Riippukannattimien välittämät vaakavoimat

Riippukannattimelta sillalle siirtyvät vaakavoima, riippuu putkistolta kannattimeen kohdistuvasta pystykuormasta F_z , kannattimen vaakasuuntaisesta siirtymästä Δx , sekä riippukannattimen ripustuskorkeudesta h .



Kuva 18: Riippukannattimen välittämät vaakavoimat

Kuvassa 18 esitetyn geometrian mukaisesti vaakavoimalle F_x voidaan johtaa yhtälö momenttiehdosta kannattimen ripustuspisteen ympäri. Kiinnikkeen vaakasuuntainen siirtymä että sekä sillan että putken lämpöliike huomioiden:

$$F_x h = F_z \Delta x \rightarrow F_x = F_z \frac{\Delta x}{h} = F_z \frac{\alpha_p \Delta T_p L_p - \alpha_s \Delta T_s L_s}{h} \quad (4.2)$$

Pystysuora kuorma F_z , N

Vaakasuuntainen siirtymä Δx , mm

Ripustuskorkeus h , mm

Lämpöpitenemäkerroin putkessa α_p , 1/K

Lämpöpitenemäkerroin sillassa α_s , 1/K

Lämpötilan muutos putkessa ΔT_p , K

Lämpötilan muutos sillassa ΔT_s , K

Etäisyys putkiston kiintopisteestä L_p , mm

Etäisyys sillan kiintopisteestä L_s , mm

Kuvassa 18 esiintyvä kiintopisteelle tuleva kokonaisvoima F_{kz} saadaan riippukannakkeiden yhteenlaskettuna vaakavoimana. Kiintopisteelle syntyvä kokonaisvoima kasvaa lineaarisesti lämpötilan kasvaessa.

Riippukannattimien tapauksessa putkien poikkisuuntaisesta liikkeestä Δy syntyvä voima F_y lasketaan samalla tavalla pituussuuntainen voima, ellei vaakasuuntaista liikettä ole estetty kynsiohjaimella, jolloin poikkisuuntainen voima lasketaan kuten luvussa 4.1.4 liukukannattimien tapauksessa.

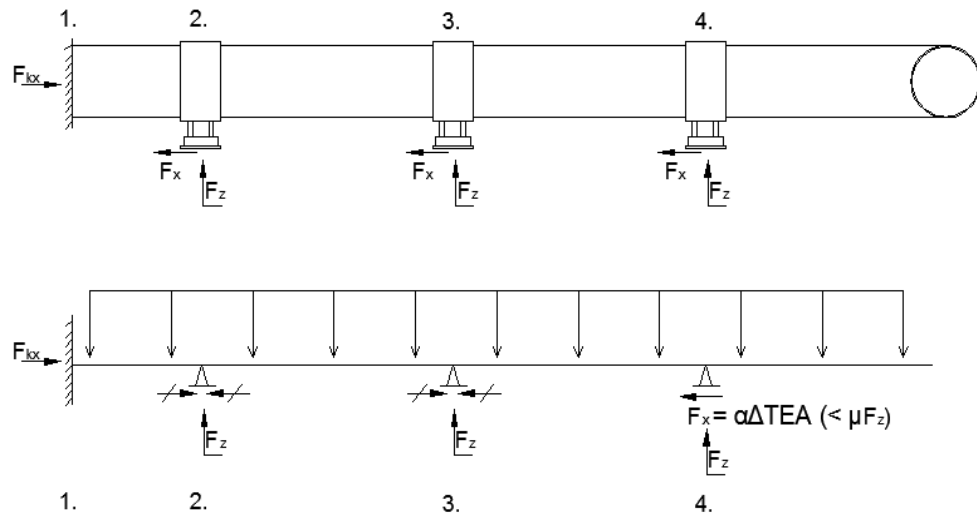
4.1.3 Liukukannattimien välittämät pituussuuntaiset vaakavoimat

Yksittäiseen liukukannattimeen suurimmillaan syntyvä voima on kannattimeen kohdistuvan pystysuoran kuormituksen ja lepokitkakertoimen tulo:

$$F_{xmax} = F_z \mu \quad (4.3)$$

SFS-käsikirjan 107 (2005) standardissa SFS 5361 esitetään liukukannattimien lepokitkakertoimelle μ arvo 0,5 huonoissa olosuhteissa ja 0,3 hyvissä olosuhteissa. PTFE levyn kanssa kitkakertoimelle saa käyttää arvoa 0,15 ja rullakannakkeiden yhteydessä kitkakerroin on noin 0,04 (valmistajan antama yläraja.) (Lisega, 2012)

Mikäli liukukannattimissa ei tapahdu muodonmuutoksia eli putken lämpöpitenemä pääsee toteutumaan ainoastaan tuen suurimman mahdollisimman lepokitkavoiman ylittyessä voidaan tilanne esitettää kuvan 19 mukaisesti.



Kuva 19: Liukukannakkeiden periaate, alla tilanne ennen ensimmäistä tuen siirtymää

Vasemmassa reunassa oleva lohkon ulkopuolinen kiintopiste 1 pysyy aina liikkumattomana tukena. Liukukannattimet (2,3 ja 4) ovat mallissa siirtymättömiä niveliä, mikäli niissä vaikuttava vaakasuora voima on pienempi kuin niissä suurimmillaan vaikuttava lepokitkavoima eli

$$F_x < F_{Z\mu} \quad (4.4)$$

Kun yllä olevan rakennemallin mukaisessa tilanteessa putken lämpötila suhteessa sitä kannattelevaan rakenteeseen alkaa muuttua syntyy putken niihin osiin jännitystä, joissa pituuden muutos on estetty. Jännitys vastaavasti aiheuttaa kannattimiin vaakasuoran voiman, jonka suuruus on Hookeen lain, sekä jännityksen- ja lämpölaajenemisen määritelmien perusteella:

$$F_x = \alpha \Delta T E A \quad (4.5)$$

Lineaarinen lämpölaajenemiskerroin α , $1/K$

Lämpötilan suhteellinen muutos ΔT , K

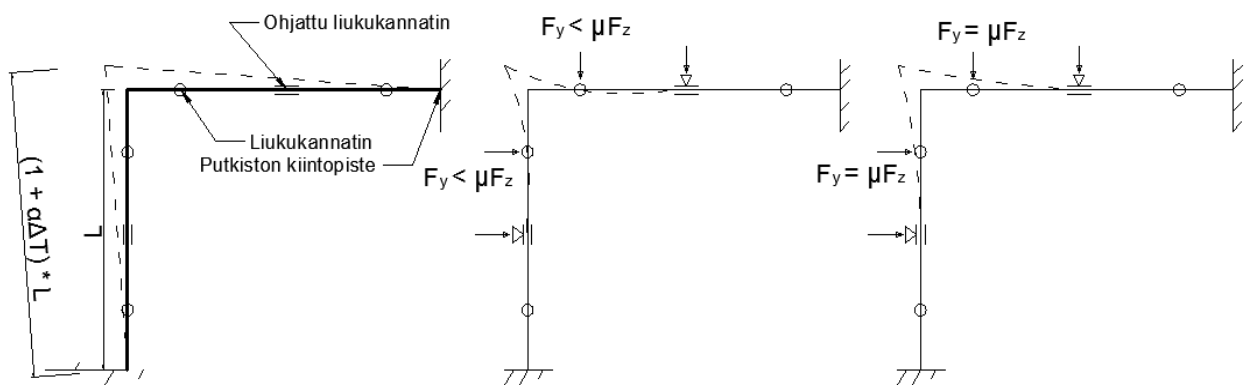
Kimmomoduuli E , N/mm^2

Putken leikkauspinta-ala A , mm^2

4.1.4 Kannattimien välittämät poikittaissuuntaiset vaakavoimat

Pituussuuntaisen liikkeen lisäksi putket pyrkivät liikkumaan sillalla myös sivusuunnassa. Syntyvien voimien analysointi on mekaniikan kannalta edellä kuvattujen pituussuuntaisten voimien määrittystä helpommin ymmärrettävissä, nämä voimat ovat enemmän riippuvaisia putkien ja putkilohkojen dimensioista sekä lämpötilan todellisista muutoksista, jolloin olosuhteet tulee tuntea. Putkiston lämpötilanvaihtelu riippuu prosessista. Ulkolämpötilan vaihtelun määrittelemiseksi tulisi käyttää Eurokoodin SFS-EN 1991-1-5 lämpötilakuormat (2009) ja kohdemaan kansallisen liitteen isotermejä.

L-muotoisessa putken mutkassa kummankin sakaran lämpöpitenemät aiheuttavat toisen sakaran päähän pakotetun sivuttaissuuntaisen siirtymän. Toisin kuin pitkittäissuuntaisessa liikkeessä liukutukien kitkavoima voi riittää estämään sivuttaissuuntaisen liikkeen, jolloin suurin sivuttaissuuntainen voima on laskettavissa staattisesti sekä yksittäiselle tuelle että koko siltalohkolle. Ohjattujen liukujen kohdalla sivuttaisliike on estetty jolloin tuen voima on aina laskettavassa staattisesti - yleensä putken mutkan jälkeen viimeistään toinen liukutuista on ohjattu, jolloin mahdollisesti siirtyviä liukutukia on ainoastaan 1. Mikäli sivuttaissuuntainen voima riittää liukutuen siirtämiseen voidaan tuki korvata tuen lepokitkavoimalla (Kuva 20).



Kuva 20: Liukukannattimien välittämät poikittaissuuntaiset voimat

Kuvan 20 vasemman puoleisessa kaaviossa on esitetty putken lämpenemisestä seuraava muodonmuutos, jossa kannattimien vaikutus on jätetty huomiotta. Putkien yhtymäkohdan paikka määräytyy tämän perusteella, sillä kannattimilla vaikuttavat kitkavoimat eivät kykene vastustamaan lämpöliikettä putkien pituussuuntaan.

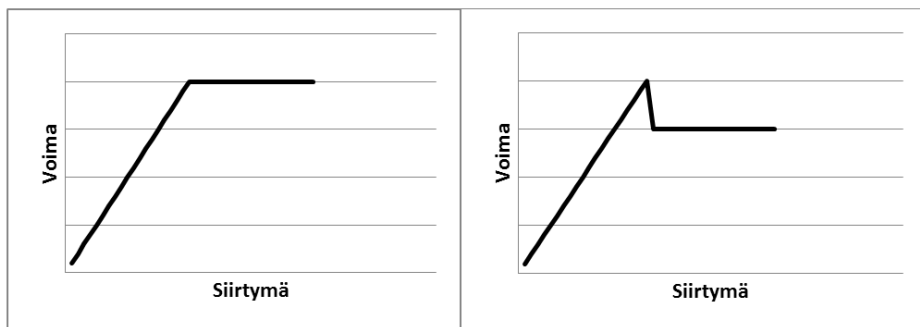
Tilanne jossa liukukannattimen maksimikitkavoima $F_z\mu$ on suurempi kuin voima, joka vaaditaan pitämään putki poikittaissuunnassa kannattimen kohdalla paikallaan, on esitetty keskimmaisessa kaaviossa. Oikean puolimmaisessa kuvassa on tapaus, jossa maksimikitkavoima ei ole pitänyt putkea paikallaan, vaan putki on siirtynyt poikittaissuunnassa - tällöin liukukannatin voidaan staattisessa mallissa korvata maksimikitkavoiman suuruisella voimalla $F_{y\max}$. Yllä kuvatus kaltainen

poikittaisuuntaisten voimien laskeminen staattisesta mallista voidaan suorittaa statiikan avulla käsin laskien tai esimerkiksi jotakin FEM-ohjelmistoa käyttäen.

4.2 Kannattimien ja siltarakenteen joustaminen

Edellisten kappaleiden rakennemalleissa (kuvat 19 ja 20) esitetyt tilanteet eivät ota huomioon putkikannattimien muodonmuutoksia. Rakenteessa tapahtuu aina joustoa, jolloin lämpöliikettä tapahtuu pienemmillä voimilla kuin mitä liukukannattimen liukumiseen vaaditaan. Myös ohjattujen liukujen ja kiintopisteiden putkikannattimet joustavat.

Joustoa tapahtuu sekä kannattimessa, että siltarakenteessa. Nämä voidaan yhdistää yksittäisen kannattimen osalta kokonaisjoustoksi. Joustoa tapahtuu liukukannattimissa niin kauan kunnes voima ylittää liukukannattimen ja siltarakenteen välisen lepokitkavoiman. Kun liukukannatin lähtee liikkeelle, ei voima enää kasva vaan jää suurimmillaan lepokitkavoiman suuruiseksi. Jos oletetaan että liike on riittävän nopeaa voidaan olettaa että lämpöliikkeen aiheuttama tuen liukuminen aiheuttaa vain liukukitkan suuruisen vaakavoiman, joka on aina lepokitkaa pienempi.

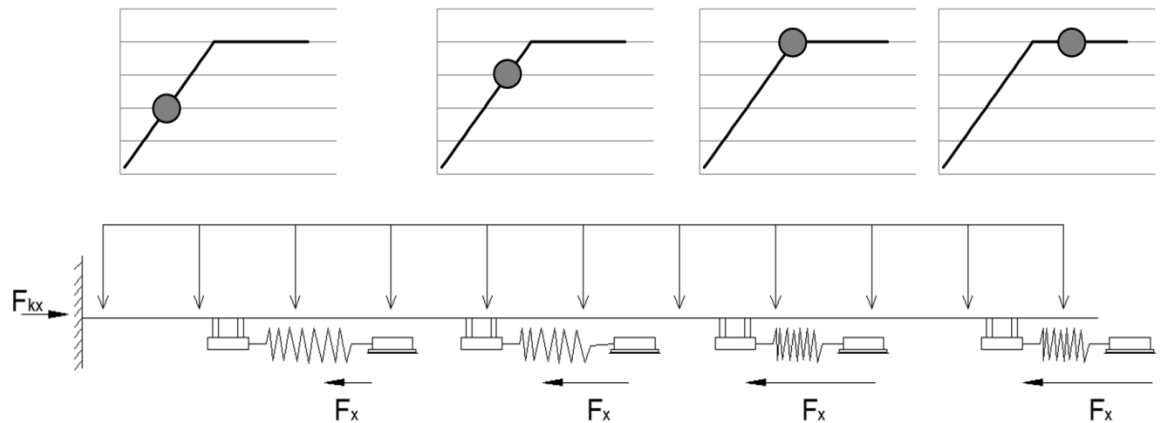


Kuva 21: Voiman kehitys siirtymän funktiona. Oletuksella että liikekitka ja lepokitka ovat yhtä suuret (vas.) tai että liikekitka on tilanteessa lepokitkaa pienempi.

Oheisissa kuvaajissa esitetty maksimivoima on siis tuella vaikuttavan pystykuorman ja kitkakertoimen tulo (yhtälö 4.3). Siirtymä, joka tuella voi toteutua ennen kitkavoiman ylittymistä on staattisesti laskettavissa sijoittamalla maksimivoimaa vastaava voima putken kiinnityspisteeseen ja laskemalla siitä aiheutuva siirtymä.

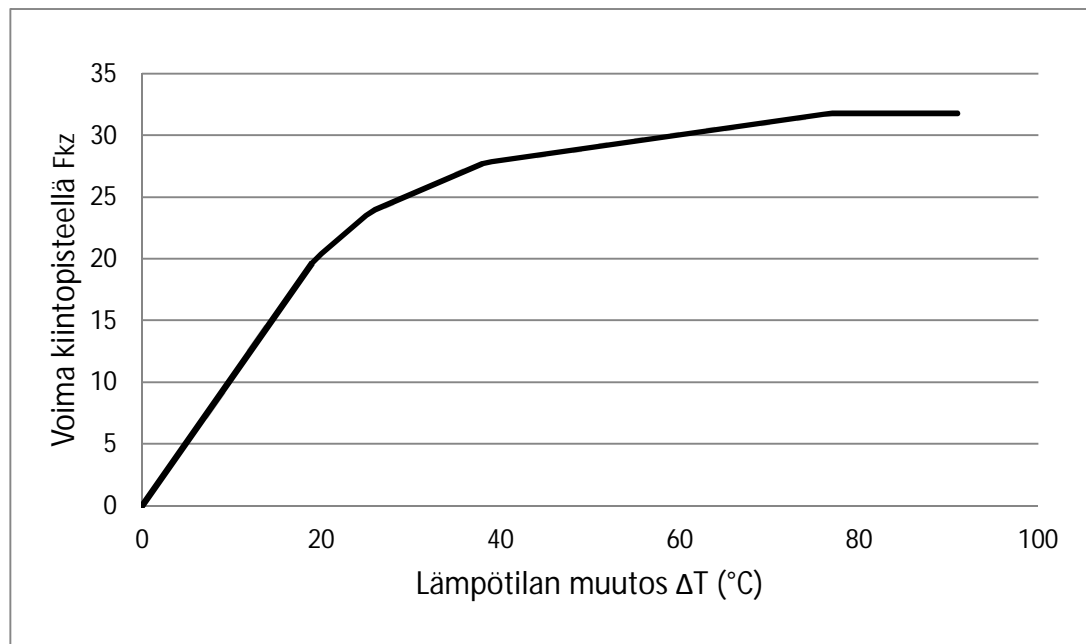
Tämän siirtymän eli kannattimen jouston laskeminen voidaan suorittaa esimerkiksi FEM-ohjelmistoa käyttäen. Liukukannattimen osien dimensiot on esitetty SFS-käsikirjassa 107 (2005). Esimerkki joustolaskelmasta on esitetty liitteessä 1.

Putkilinjalla on useita peräkkäisiä liukukannattimia, joissa voima kehittyy eri tahtiin riippuen niiden etäisyydestä kiintopisteeltä. Jos oletetaan että liikekitka ja lepokitka ovat saman suuruiset voidaan voiman kehittymistä havainnollistaa kuvan 22 esittämällä tavalla. Kuvassa voima/siirtymä jokaisen tuen osalta tietyllä ajan hetkellä.

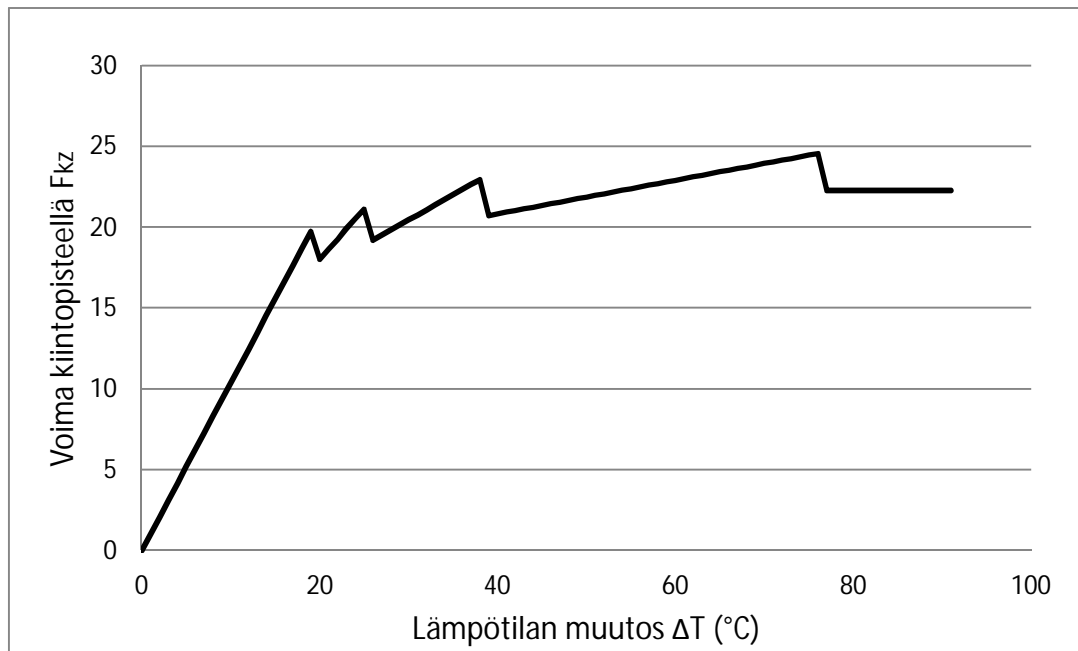


Kuva 22: Voiman kehittyminen putkilinjan kannattimilla

Vaakasuuuntainen voima kehittyy suhteessa kannattimessa tapahtuvaan joustoon. Kuvan tilanteessa viimeinen kannattimista on lähtenyt liukumaan ja toiseksi viimeinen on juuri lähtemässä liikkeelle. Jos tarkastellaan kuvan 22 systeemissä kiintopisteelle syntyvää voimaa suhteessa lämpötilan muutokseen DN500 linjan liitteessä 1 lasketuilla arvoilla (täysin kehittynyt kitkavoima 7,94 kN, liukukannattimien välinen etäisyys 10 metriä ja jousivakiolla -923 kN/m) saadaan oheisen kaltaiset kuvaajat (Kuva 23 ja 24) Ensimmäisessä liukukitka on oletettu lepokitkan suuruiseksi ja jälkimmäisessä liukukitka 30% lepokitkaa pienemmäksi.



Kuva 23: Voiman kehittyminen 4 liukukannattimen systeemissä. Lliukukitka ja lepokitka oletetaan saman suuruiseksi

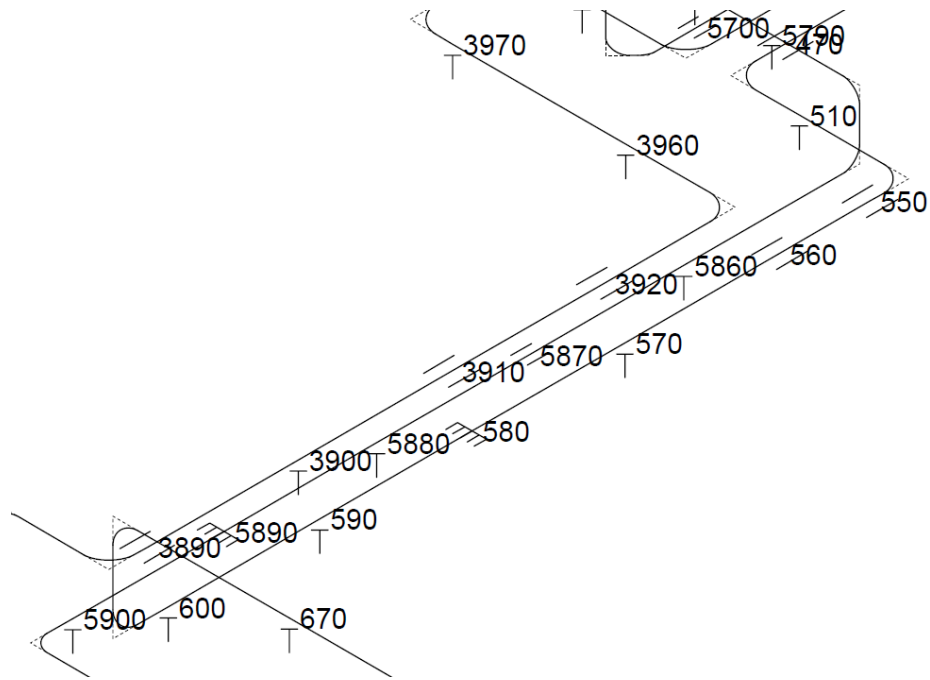


Kuva 24: Voiman kehittyminen 4 liukukannattimen systeemissä, kun liukukitka oletetaan 30% lepokitkaa pienemmäksi.

Kyseisillä arvoilla täysi lepokitkavoima kaikilta liukukannattimilta toteutuu putken ja sillan keskinäisen lämpötilaeron muuttuessa noin 80 asteella. Kyse on ainoastaan esimerkkitapauksen keskimmaisista putkista, reunassa olevien putkilinjojen jousivakio on suurempi ja täysi lepokitka toteutuu pienemmillä lämpötilan muutoksilla. Jos putkisto lämpenee vähemmän kuin mainitut 80 astetta, ei täyttä kitkavoimaa kaikkien kannattimien osalta saavuteta. Tällöin myös yksi tai useampi liukukannattimista ei tule koskaan liikkumaan vaan lämpöliike toteutuu pelkästään kyseisen kannattimen joustona.

4.2.1 Putkiston joustoanalyysin käyttäminen putkisillan suunnittelussa

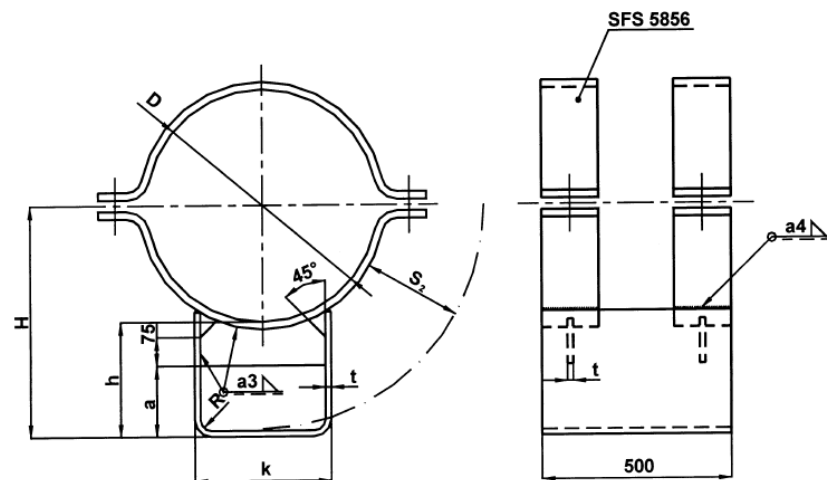
Putkistosuunnittelijan tekemän joustoanalyysin voimat perustuvat usein oletukseen että putkikannattimet ja silta ovat täysin jäykkiä, eli mitään liikettä kannattimissa ei tapahdu, paitsi liukukannattimissa, joissa vaikuttaa suurin mahdollinen kitkavoima. Putkiston joustoanalyysistä saadut reaktiovoimat eivät yleensä vastaa voimia joita rakenteessa todella syntyy. Syitä voimien ja momenttien vääristymiseen on muitakin, mutta tärkein on oletus putkiston tukien eli putkikannattimien joustamattomuudesta.



Kuva 25: Yksityiskohta putkisillan solmukuvasta

Yllä olevan esimerkin mukaisessa tilanteessa ohjatut liukukannattimet 470 ja 550 ovat lähellä putkilinjan käännöstä. Kun käännösten välissä olevassa putken osassa tapahtuu lämpötilan muutos, jonka suuruudeksi on tilanteessa oletettu 100°C syntyy ohjattuihin liukukannattimiin ohjausvoimat, jotka ovat saman suuruiset ja vastakkaissuuntaiset. Joustolaskelmaraportin mukaan ohjausvoima joka tuilla vaikuttaa on noin 220 kN, jolloin putken pituussuuntainen kitkavoima on 66 kN, kun kitkakertoimenä käytetään arvoa 0,3.

Kyseinen putkilinja on eristetty nestetäytteinen DN600 ja putken suora osuus käännösten välissä on noin 6 metriä. Putkelle käytetty kannatintyyppi on standardin SFS 5860 mukainen.



Kuva 26: SFS 5860 Putkikannatin

Yllä olevan tilanteen mukainen liukukannattimelta 550 todellisuudessa siirtyvän voiman tarkastelu on esitetty liitteessä 2. Laskelman tuloksena tilanteessa todella syntyvä ohjausvoima on 40 kN, jolloin putken pituussuuntainen kitkavoima olisi enimmillään 12 kN. Ohjausvoima syntyy tässä putkikannattimen nojaamisesta ohjuria vasten. Tapauksessa ei ohjurilla ole putken lämpöliikkeen kannalta merkittävää ohjaavaa vaikutusta, vaan putken lämpöliike pääsee toteutumaan lähes samalla tavalla kuin kyseessä olisi tavallinen liukukannatin.

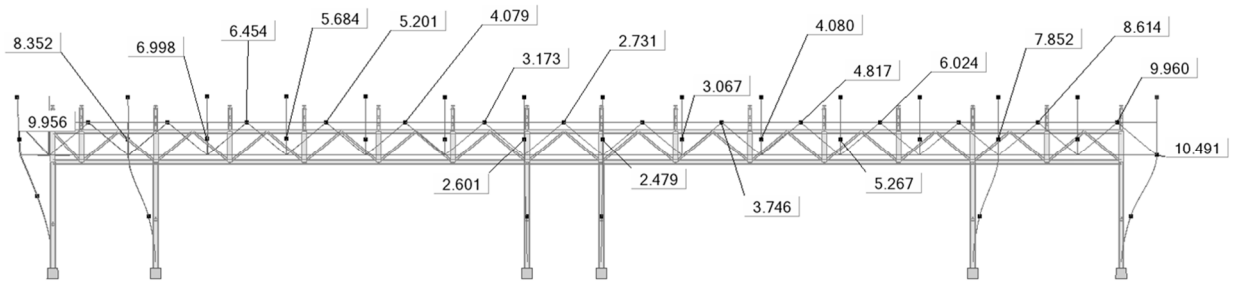
Kiintopisteenä toimivan putkikannattimen 580 putken suuntainen voima on joustolaskelmaraportin perusteella 143 kN. Tuloksessa on laskettu yhteen eri puolella kiintopistettä olevien liukukannattimien kitkavoimat, vaikka kyseiset voimat ovat putken lämmitessä tai jäähtyessä vastakkaissuuntaisia. Kun otetaan huomioon vastakkaisuuntaisten voimien kumuloituminen ja kannattimen 550 liian suuriksi lasketut voimat on todellinen putken suuntainen kiintopistevoima luokkaa 15-20 kN.

Voimien muutoksilla on vaikutusta myös kannattimen 580 muun suuntaisiin kiintopistevoimiin ja kiintopisteelle syntyviin momentteihin. Myös kiintopisteenä toimivan putkikannattimen joustaminen vaikuttaa näihin voimiin. Erityisesti suuret kannattimelle lasketut momentit eivät ole mahdollisia, sillä kannattimien jousivakio kiertymälle on pieni ja putkilinjan kiertyminen jää vähäiseksi, jolloin momentti, jonka kiintopisteenä toimiva kannatin todellisuudessa välittää on pieni. Kannattimien ja siltarakenteen joustamista käsitellään lisää kappaleessa 7.

4.3 Jäykistysjärjestelmät ja putkisillan lohkojako

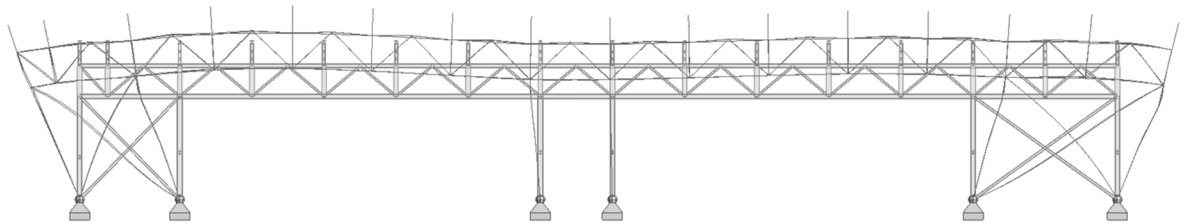
Putkisillan pituus- ja poikittaissuuntainen jäykistäminen voidaan toteuttaa diagonaalisauvoilla, alapäästään jäykillä pilareilla tai näiden yhdistelmillä. Diagonaalisauvaan perustuvassa jäykistyksessä putkisillan vaakavoimat siirtyvät perustuksille diagonaalisauvan normaalivoimana eli puristuksena tai vetona. Alapäästään jäykkä pilari taas siirtää vaakavoimat perustuksille momenttirasituksena.

Mikäli putkisilta jäykistetään alapäästään jäykillä pilareilla, voi jäykistys tapahtua useissa pisteissä, esimerkiksi koko siltalohkon matkalla, jolloin yksittäiselle perustukselle tulevat kuormat pysyvät kohtuullisina. Putkisillan kiintopiste, jonka suhteen sillan lämpöliike tapahtuu muodostuu jäykistävien pilareiden sijainnista ja jäykkyydestä riippuen. Tyypillisesti kiintopiste muodostuu melko keskellä siltalohkoa kuvan 27 mukaisesti.



Kuva 27: Putkisiltalohko, momenttijäykät pilarit.

Diagonaalijäykisteitä käyttäen on siltalohkolle valittava yksi kiintopiste. Jos siltalohko jäykistetään diagonaalisauvoilla useammasta kuin yhdestä paikasta syntyy jäykistyspisteiden välille sillan lämpöliikkeestä pakkovoimia, joita sillan rakenteiden ja perustusten on vaikeaa saada kestämään. Sillan todellinen kiintopiste muodostuu sillan keskivaiheille. Ratkaisu ei yleensä ole käyttökelpoinen.



Kuva 28: Putkisiltalohko, jäykisteet kummassakin päässä siltaa. Siltaa ja perustuksia on vaikea saada kestämään kuvan mukaisessa tilanteessa syntyviä pakkovoimia.

Putkisillan lohkon enimmäispituus määräytyy lämpöliikkeestä ja pilarin yläpäiden suurimmasta sallitusta siirtymästä. Ulkolämpötilan vaihtelun määrittelemiseksi tulee käyttää Eurokoodia SFS-EN 1991-1-5 lämpötilakuormat (2009) ja kohdemaan kansallisen liitteen isotermien mukaista lämpötilan vaihtelua.

Suomen kansallisen liitteen 6.1.3.1 (4) määrittely on tarkoitettu liikennöidyille terässilloille, joita peittää siltakansi, joten sen ohjeistus ei yleensä ole suoraan sovellettavissa putkisillalle vaan käytetään standardin yleisiä määrittelyjä.

Sillan pilarin yläpään suurin siirtymä on suurempi seuraavista:

$$s = \alpha \Delta T_+ L \quad (4.6)$$

$$s = \alpha \Delta T_- L \quad (4.7)$$

Lineaarinen lämpölaajenemiskerroin α , $1/K$

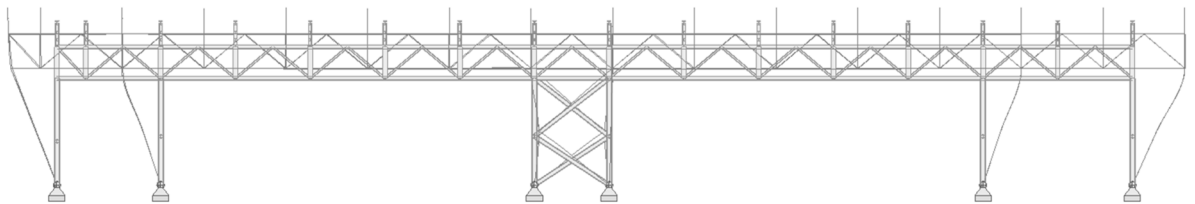
Lämpötilan nousu asennustilanteesta ΔT_+ , K

Lämpötilan lasku asennustilanteesta ΔT_- , K

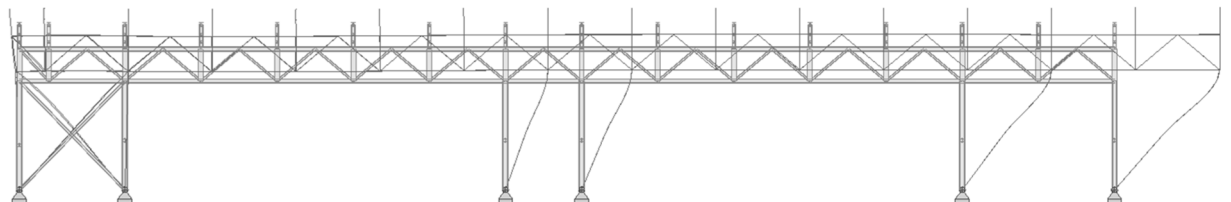
Pilarin etäisyys sillan kiintopisteestä L , m

Pilarin yläpäälle sallitaan yleensä siirtymä $H/150$, joka perustuu standardin SFS-EN 1991-1-1 kansallisen liitteen taulukossa 7.1 (FI) esitettyyn arvoon. Putkisiltojen pilareiden korkeus vaihtelee, mutta usein sillan tarkoitus on ylittää ajoneuvoliikenteen kulkutie, jolloin pilarin korkeus on noin 4-5 metriä. Pilarin korkeuteen vaikuttaa tällöin putkisillan perustusten korkeus maan pinnasta.

Jos ajatellaan tyypillistä tapausta, jossa silta asennetaan $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa, sillan osalta varaudutaan 60 asteen lämpötilan nousuun ja sillan pilarit ovat 4,5 metriä pitkiä voi pilarin etäisyys olla suurimmillaan noin 40 metriä siltalohkon kiintopisteestä. Jos kiintopiste on keskellä siltaa, voi siltalohko olla kaksi kertaa tämä mitta eli noin 80 metriä. Lohkon enimmäispituus määrittyy siis pilareiden korkeuden, lämpötilan odotetun vaihtelun ja kiintopisteen sijainnin perusteella.



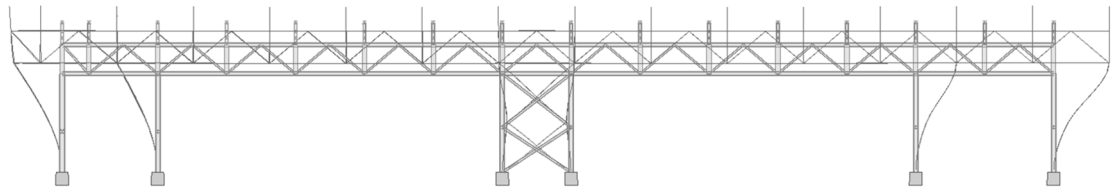
Kuva 29: Kiintopiste keskellä putkisiltaa



Kuva 30: Kiintopiste putkisillan päässä

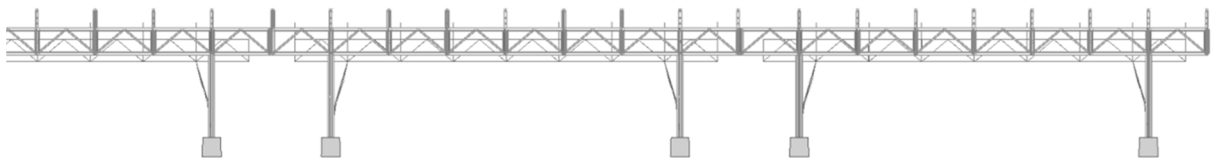
Edellä kuvatuissa rakennemalleissa sillan ja perustusten liitos oletettiin nivelelliseksi. Mikäli tällainen oletus tehdään, tulee liitos suunnitella pituussuuntaisesti todelliseksi niveleksi tai todeta liitosta analysoimalla, että liitos käyttäytyy nivellisesti.

Usein pilareiden liitokset perustuksiin eivät käytännössä toimi nivellisinä, jolloin pilareiden alapäiden tuet tulee mitoittaa jäykkinä. Asentamisen kannalta pilareiden alapäiden jäykkyys on usein tarpeellista. Pilarit kykenevät joustamaan diagonaalijäykistettä enemmän, jolloin pakkovoimat eivät aiheuta samanlaisia ongelmia kuin aiemmin vaikeaksi todetun kuvan 28 tapauksessa. Osa diagonaalijäykistykseen hyödystä tapauksessa menetetään, kun pilarit ja perustukset tulee mitoittaa momenttijäykkinä.



Kuva 31: Kiintopiste keskellä putkisiltaa, pilarien alapäävät momenttijäykkiä

Jos putkisilta jäykistetään momenttijäykillä pilareilla, antaa se diagonaalijäykistystä paremmin mahdollisuuksia tehdä lohkoista hyvin lyhyitä, jolloin lämpöliikkeestä syntyvät siirtymät yksittäisessä lohkossa jäävät hyvin pieniksi. Putkisiltalohkojen ei ole tarpeellista olla täysin irrallaan, vaan peräkkäiset lohkot voivat olla liitetty toisiinsa esimerkiksi soikeiden reikien avulla niin, että lämpöliike pääsee tapahtumaan esteettä. Liitoksen riittävä välys lämpöliikkeen mahdollistamiseksi lasketaan yhtälöiden 4.6 ja 4.7 mukaisesti.



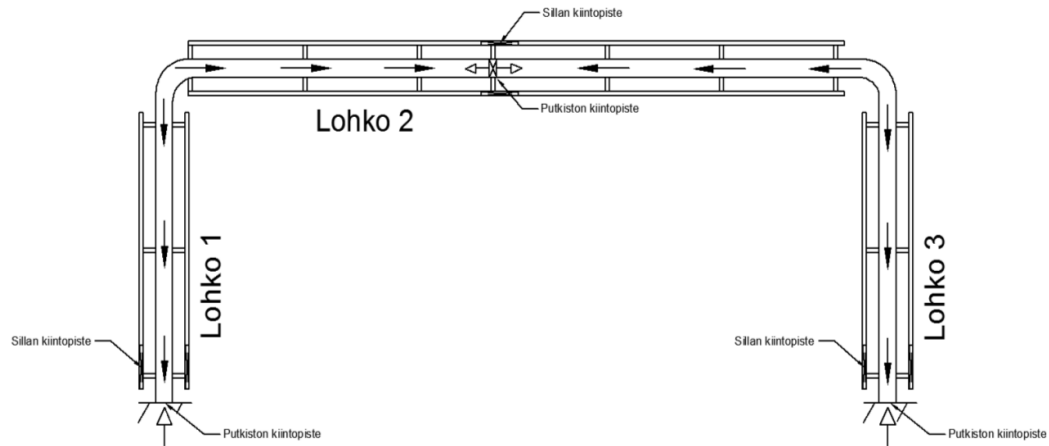
Kuva 32: Lyhyitä putkisiltalohkoja, momenttijäykät pilarit

4.4 Rakenneratkaisujen ja tasainten vaikutus voiman suuruuteen

Sekä liuku- että riippukannattimien yhteydessä on syytä huomioda että mikäli kannattimet ja putkiston kiintopiste sijaitsevat samalla siltalohkolla kiintopiste- ja kitkavoimat kumoutuvat sillassa, eikä mitään perustuksille vietävää resultanttia synny.

Kuvassa 31 tällainen tilanne toteutuu lohkossa 2. Sillan ja putkiston kiintopisteiden ei tarvitse olla keskellä siltaa, eikä keskenään samassa paikassa.

Kiintopiste- ja kitkavoimat ovat toistensa vastavoimia ja kohdistuessaan samaan lohkoon ovat nämä voimat lohkon sisäisiä voimia ja ne tulee huomioida ainoastaan paikallisesti.



Kuva 33: Putkisillan lohkojako. Sillan ja putkiston kiintopisteet. Kiintopistevoimat merkitty vaaleilla nuolilla, kitkavoimat tummilla.

Kuvassa on esitetty siltalohkojen reunapalkit ja liukukannattimia tukevat palkit. Jokaisella lohkolla tulee siis sillan pituussuunnassa olla kiintopiste, joka jäykistää siltalohkon. Muilta osin siltalohkolle tulee mahdollistaa pituussuuntainen liike, jottei siltaan synny pakkovoimia. Kuten aiemmin todettua, ei lohkolla 2 synny siltaa kaatavaa resultanttia, sillä putkiston liukukannakkeilta kertyvät voimat (kuvassa umpinaiset nuolet) ja niiden vastinparina kiintopisteelle syntyvä voima (avoin nuoli) sijaitsevat samalla lohkolla ja siten kumoavat toisensa. Lohkoilla 1 ja 3 kiintopiste sijaitsee lohkon ulkopuolella, jolloin kaatava kitkavoimien resultantti syntyy ja se on kiintopisteellä vaikuttavan vastavoiman suuruinen.

Putkien kiintopisteiden ja kannattimien kitkavoiman kumoutumisen vuoksi olisi kitkavoiman minimoimisen kannalta järkevää tehdä lohkoista yhtä pitkiä kuin putkisillan yksittäinen suora osa, jolloin kaikki putkisillan pituussuuntaiset voimat kumoutuisivat sillassa. Kappaleen 4.3 perusteella lohkon enimmäispituus asettaa tähän rajoitteita. Lisäksi sillan omista pakkovoimista syntyvät voimat, sekä sillan pilareiden kiertymästä syntyvä lisävaakavoima kasvavat suuremmiksi lohkojen pidetessä.

Kun sillan lämpötila ja pituus muuttuvat kappaleessa 4.3 esitetyn mukaisesti aiheuttaa tämä kiertymää pilareihin. Kiertymä aiheuttaa pystysuoraan kuormitukseen vaakasuuntaisen lisäkomponentin, joka on riippuvainen pystykuorman lisäksi vaakasuuntaisesta siirtymästä ja pilarin pituudesta.

$$F_x = F_z \frac{\Delta x}{H} \quad (4.8)$$

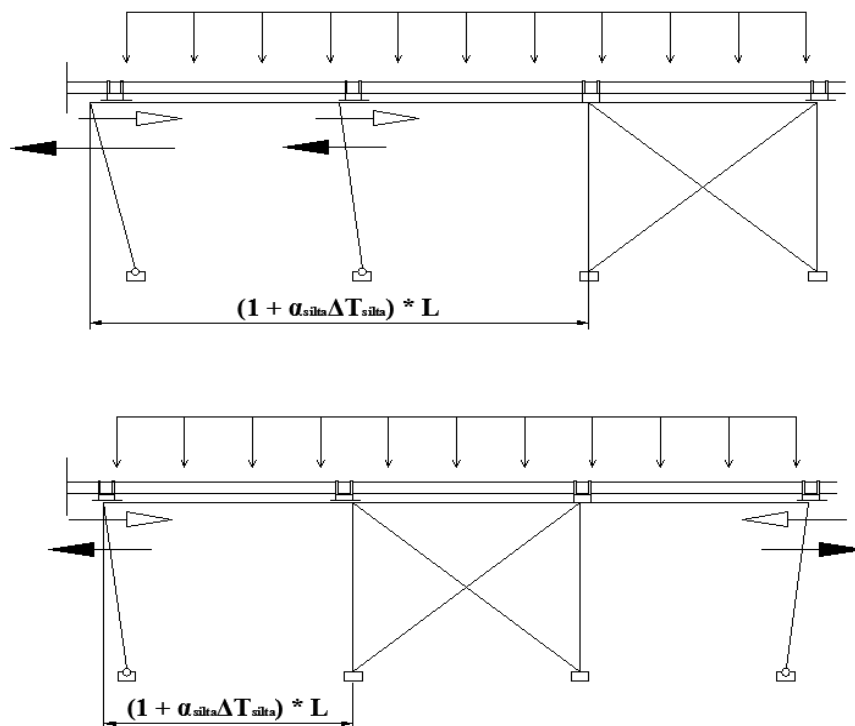
Pystysuora kuorma F_z , N

Vaakasuuntainen siirtymä, Δx , mm

Pilarin korkeus H , mm

Kiertymän aiheuttama lisävaakavoima on riippuvainen paitsi sillan mitoista myös sillan kiintopisteen sijainnista. Kuvan 33 mukaisesti kiintopisteen sijoittaminen siltalohkon keskelle on edullista vinoutumisesta syntyvän voiman minimoimiseksi. Kiertymä sillan päissä on tällöin vastakkaissuuntainen ja vinoudesta syntyvät voimat kumoavat toisiaan osittain tai kokonaan.

Pilarin yläpäälle sallitaan yleensä siirtymä $H/150$, joten pilarin kiertymästä syntyvä lisävaakavoima on suurimmillaan 0,67% pystysuuntaisesta kuormasta. Voiman vaikutus putkisillan kokonaisvaakakuormiin on siten yleensä varsin vähäinen.

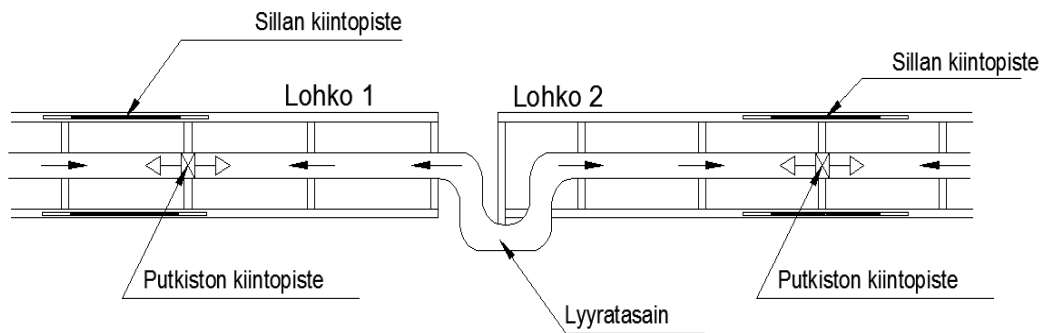


Kuva 34: Periaatekuva sillan lämpenemisen aiheuttamista vaakavoimista sillalle eri kiintopisteen sijainnilla, kun putken lämpötila pysyy vakiona. Liukukannattimelta siirtyvät kitkavoimat (avonaiset nuolet) ja vinoudesta syntyvä vaakavoima (umpinaiset nuolet) kumoavat toisensa alemmassa tilanteessa.

Yllä olevan kuvan mukaisesti kiintopisteen sijoittelu vaikuttaa myös kitkavoimaan siltä osin kun se syntyy sillan omasta lämpöliikkeestä. Jos kiintopiste on keskellä siltaa ja silta lämpenee tai jäähtyy tapahtuu sillan liike sillan eri päissä symmetrisesti

vastakkaisiin suuntiin, jolloin kehittyvät voimat sillan vastakkaisissa päissä kumoavat toisensa, kuten kuvan 34 alemmassa esimerkissä.

Kappaleessa 3.1 esitettyjen tasainten tarkoitus on kompensoida lämpöliike siten että tasaimen kohdalla putkilinjan liike on vapautettu, eikä putkisto siirrä voimia tasaimen yli. Tasain muistuttaa putkilinjan käännöstä siten, että tasaimen kummallakin puolella voi olla putkiston kiintopiste. Erona putkiston käännöksessä ja tasaimessa on, ettei tasaimen tapauksessa synny mutkasta aiheutuvaa poikittaissuuntaista voimaa, jolloin kappaleen 4.1.4 tarkastelua ei tarvita. Tasaimien sijoittelun määrää putkistosuunnittelija. Jos tasainten sijainti on tiedossa siltaa suunnitellessa, on edullisinta suunnitella silta siten, että tasain osuu lohkojen rajalle ja estää näin lämpökuorman siirtyminen lohkolta toiselle. (Kuva 35)



Kuva 35: Voimat eivät siirry lyyratasaimen yli, jolloin putki voidaan kiinnittää kumpaankin siltalohkoon. Kitkavoimat (umpinaiset nuolet) ja kiintopistevoimat (avoimet nuolet) kumoavat toisensa kummassakin lohkoissa.

4.5 Putkisillan muodonmuutoskyky

Estetystä lämpöliikkeestä aiheutuvat voimat ovat pakkovoimia, joiden käyttäytyminen poikkeaa oleellisesti muista kuormista. Mikäli estetty voima kasvaa ja saa aikaan liikettä, voima vähenee liikkeen seurauksena. Mikäli rakenne antaa periksi siten että estetty liike toteutuu täysin, voima häviää. Lämpöliikkeestä aiheutuva voima ei aiheuta haitallisia yhdistelmiä muiden kuormitusten kanssa, sillä lämpöliikkeen aiheuttaman voiman suuntainen lisäkuormitus esimerkiksi tuulesta tai vinoudesta aiheuttaa rakenteeseen siirtymiä, jotka pienentävät vastaavasti estetyn lämpöliikkeen aiheuttamaa voimaa.

Rakenteiden murtorajatilamitoitus perustuu ajattelulle, että rakenteiden kestävyys ja odotettavissa olevien rasitusten välillä on riittävä varmuus. Standardeissa säädetyillä todennäköisyyksillä kertoimilla vältetään rakenteita saavuttamasta murtorajatilaa, jossa rakenne sortuu, aiheuttaa vaaraa ihmisille, varastoitavalle aineelle tai tavaralle. (SFS-EN 1990 Luku 3.3 Murtorajatilat, 2006)

Liukukannatin voi muuttua kiintopisteeksi esimerkiksi:

- Putkistolinjan poikittaisen liikkeen vuoksi, joka aiheuttaa liukukannattimen kiilautumisen kynsiohjaimeen.
- Ruostumisen, jäätymisen tai liukupintojen epäpuhtauksien seurauksena, jolloin kitkakerroin voi nousta moninkertaiseksi suunniteltuun nähden.

Näissä tapauksissa sillan jokin muu osa myötää helpommin kuin liukukannatin liikkuu. Lämpökuorman luonteesta johtuen tilanne ei välttämättä johda murtorajatilaan, vaikka yksittäisten osien kestävyys ylittyisikin.

Liikenneviraston tulkinta betonirakenteisille maantie- ja ratasilloille yleisessä tapauksessa on jättää pakkovoimat huomioimatta murtorajatilatarkastelussa, sillä rakenteessa oletetaan olevan riittävästi muodonmuutoskapasiteettiä (NCCI 2, 2012, s. 37). Liikenneviraston teräsiltoja käsittelevä eurokoodin soveltamisohje NCCI 4 on vielä keskeneräinen. Liikenneviraston silta-asiantuntija Heikki Lilja ja viraston käyttämän asiantuntijan Juhani Hyvösen (Pontek Oy) mukaan pakkovoimia ei tarvitse huomioida murtorajatilamitoituksessa mikäli voimaa siirtävät rakenteet ovat poikkileikkausluokissa 1 ja 2 (Lilja, sähköpostiviesti, 2012).

Tätä perustellaan poikkileikkauksen kyvyllä myötää ennen stabiliteetin menetystä, jolloin voidaan käyttää plastista mitoitus. Stabiliteetin menetyksellä on kuitenkin merkitystä vain puristettujen rakenneosien kohdalla. Silta voidaan jäykistää siten että jäykisteissä esiintyy ainoastaan vetorasitusta käyttämällä diagonaalisauvoina profilia,

jolla ei ole puristuskestävyyttä lainkaan tai sitä on hyvin rajallisesti. Stabiiliteetin menetys pienellä voimalla on tällöin rakenneosalle edullista, sillä rakenneosaan ei synny vaurioita tai pysyviä muodonmuutoksia ennen voiman siirtymistä nurjahtavan jäykisteen vastaparina toimivalle vetosauvalle. (Liite 3, kuva 1)

Liitteessä 3 on esitetty tarkastelu putkisillalle, jossa liukukannatin on muuttunut kiintopisteeksi ja laskettu sillan pitkittäin jäykistävän diagonaalisauvan jousivakio. Jos liitteessä 1 ja liitteessä 3 tarkasteltu putkisilta olisivat sama rakenne, olisi diagonaalien jäykkyys moninkertainen liukukannattimien ja niitä kannattavan palkin jäykkyyteen nähden. Yksittäisen liukukannattimen ja palkin yhdistelmälle laskettiin jousivakio -923 kN/m, diagonaalisen vetosauvan jäykkyys on -33399 kN/m. Aksiaalinen jäykkyys on yleensä huomattavasti taivutusjäykkyyttä suurempi.

Mikäli yllä liitteen 3 esimerkin mukaisesti kaikki muodonmuutos tapahtuisi diagonaalisauvoissa putkisillan pilareiden yläpään suurimmat siirtymät olisivat 60 mm. Tämä ylittää käyttörajan selvästi, eikä tilannetta voida rakenteelle hyväksyä.

Todellisuudessa muodonmuutokset rakenteessa tapahtuvat jäykkyyksien suhteessa, jolloin valtaosa liikkeestä tapahtuisi liukukannattimien ja niitä kannattavan palkin taipumana ja diagonaalisauvat venyisivät hyvin vähän ja pysyisivät kimmoisella alueella. Kannattimien lukkiutumiseen varautuminen ei yleensä ole siltarakenteen mitoittamiseen vaikuttava tekijä. Varsinaiseksi ongelmaksi syntyneen pakkovoiman tapauksessa tulisi putkikannattimelle aiheutuvat vauriot, jonka vuoksi lukkiutumista kiintopisteeksi tulee välttää.

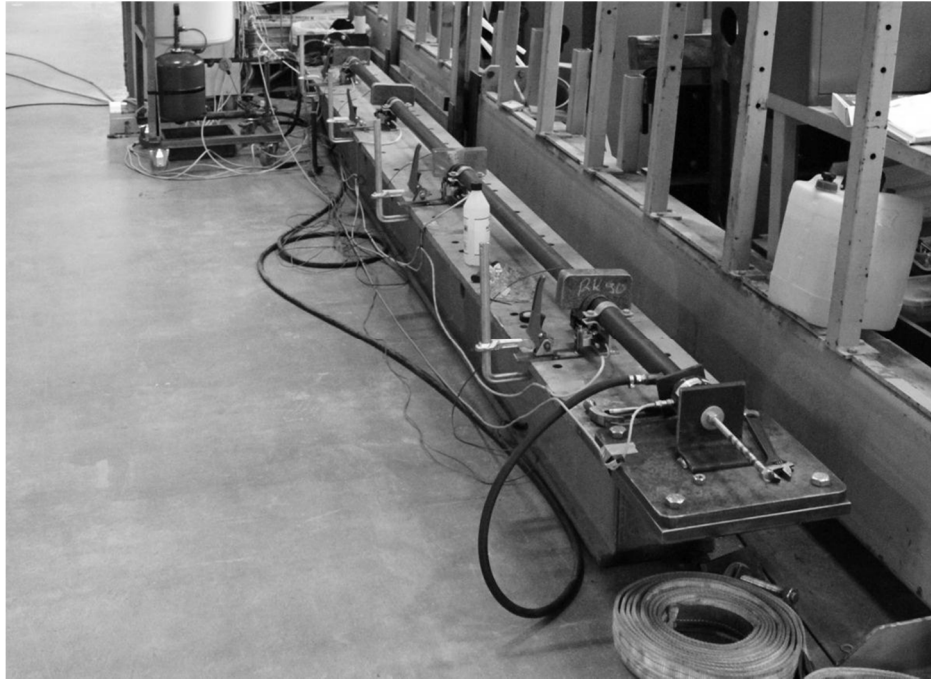
5 KOKEELLINEN TUTKIMUS

Tässä luvussa esitellään suoritettu kokeellinen tutkimus lämpöliikkeestä aiheutuvien kitkavoimien määrittämiseksi ja esitellään mittauksista saadut tulokset.

5.1 Koejärjestelyt

Kokeelliseen tutkimukseen päädyttiin lämpenemisestä kiintopisteelle syntyvän voiman laskemismenetelmään liittyvän epävarmuuden vuoksi. Laskelmiin erityisen epävarmuuden aiheuttaa kitkakertoimen suuruuden tulkinta hitaan liikkeen aikana, josta riippuen kuva 23 tai 24 olisi lähempänä totuutta.

Suurin käytännöllinen motiivi kokeellisen tutkimuksen tekoon oli mahdollisuus osoittaa lämpöliikkeen seurauksena syntyvä kiintopistevoima selvästi koko putken painosta syntyvää lepokitkaa pienemmäksi. Tällaisen tuloksen saaminen kokeellisesti olisi mitoituksen kannalta hyödyllinen siinäkin tapauksessa, ettei ongelman varsinainen mekaaninen luonne selviäisi. Eurokoodi antaa mahdollisuuden kokeellisten tuloksien käyttöön mitoituksessa (SFS-EN 1990 Luku 5.2, 2006) Jotta kokeellisilla tuloksilla olisi riittävä luotettavuustaso ja käyttöarvo putkisiltojen mitoituksessa olisi kokeita tehtävä runsaasti. Lisäksi kokeessa vallitsevien olosuhteiden tulisi vastata paremmin todellista asetelmaa, jolloin mittaukset olisi järkevää suorittaa olemassa olevissa putkisilloissa. Nyt suoritetuilla mittauksilla on merkitystä arvioitaessa voisiko laajempiin mittauskokeisiin olla tarvetta.

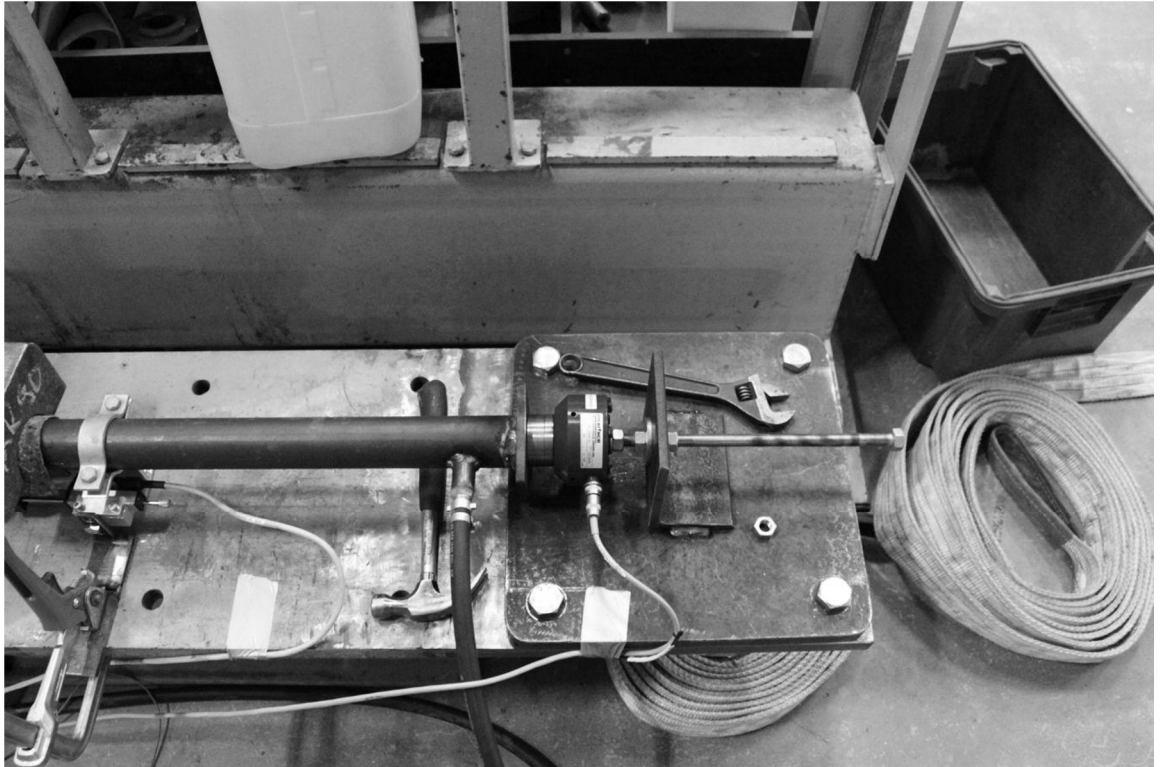


Kuva 36: Yleiskuva koelaitteistosta

Kokeet suoritettiin TTY:n rakennushallissa 10.9 – 1.10 2012 välisenä aikana. Kokeessa tutkittiin teräksisen DN50 (60,3 x 2,3) putken lämpenemisestä syntyvää voimaa kiintopisteelle tapauksessa jossa putkea kannateltiin 2:lla ja 4:llä SFS-standardin mukaisella liukukannattimella. Voima mitattiin Interface 25kN – voima-anturilla. Lisäksi vertailuarvona tutkittiin täyttä kitkaa vetämällä putkea alustaa pitkin ja mittaamalla liikkeellelähtöön vaadittavaa voimaa.

Putki lämmitettiin kierrättämällä putken läpi kuumaa vettä. Liukukannattimet olivat kaikki keskenään saman järeän palkin päällä, joten kaikki rakenteessa tapahtunut jousto tapahtui liukukannattimissa ja niiden liitoksessa putkeen.

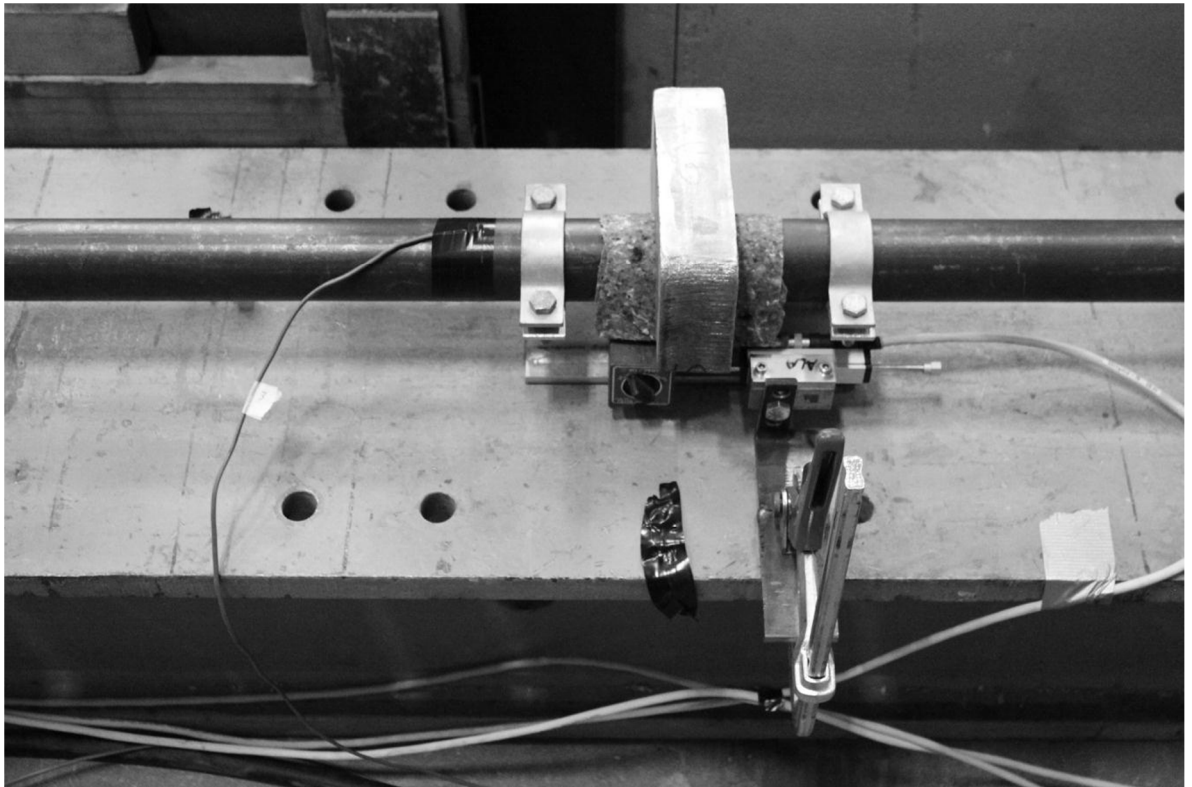
Kokeissa mitattiin voiman lisäksi lämpötilaa 5 pisteestä putken pinnalta, sekä putken menevän ja poistuvan veden lämpötilaa. Myös jokaisen liukukannattimen siirtymää mitattiin mittakellolla. Putkeen lisättiin ylimääräistä painoa, jotta tulokset olisivat suurempia ja sopisivat siten paremmin voima-anturin mittausalueelle. Putken kokonaispaino mitattiin punnitsemalla kaikki käytetyt osat erikseen ja tarkastamalla mittaukset punnitsemalla vedellä täytetty putki kannattimineen suurella jousivaa'alla. Yksittäisillä tuilla vaikuttavat pystykuormat laskettiin kokonaisarvosta kannattimien etäisyyksien perusteella.



Kuva 37: Interface 25kN – voima-anturi keskellä. Anturi on liitetty tietokoneeseen datakaapelilla. Putkea lämmittävän vesikierron ulostuloletku putken päätylevyn läheisyydessä.

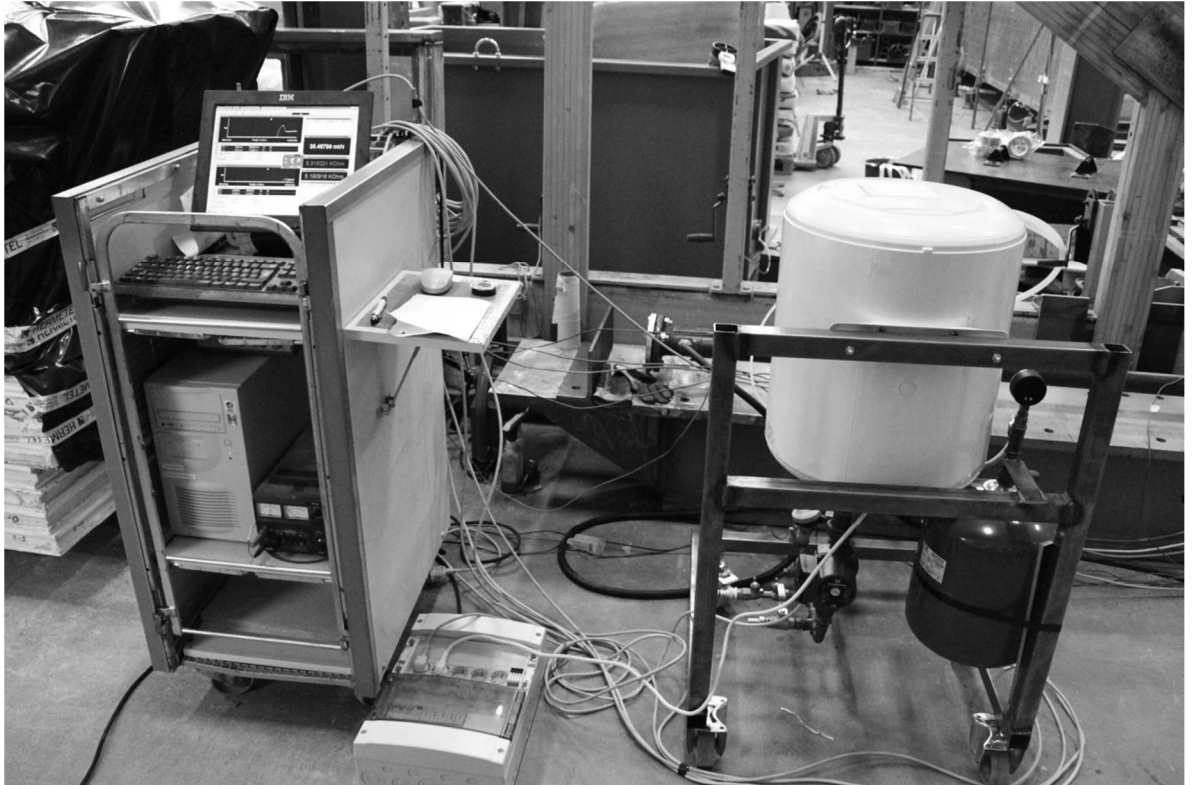
Putkea lämmittävän veden kiertosuunta oli valittu niin että vesi kulki voima-anturia kohti, jotta sen vaikutus mittaustuloksiin olisi enemmän mittauksessa saatavia voiman arvoja kasvattava kuin pienentävä. Virtauksen putkessa tapahtuvan hidastumisen vaikutus kokonaisvoimaan voidaan olettaa vähäiseksi.

Voima välittyi putkeen hitsatun päätylevyn ja voima-anturin välillä puhtaasti pintakosketuksena. Lämmityskokeiden alussa putken päätylevy oli hienoisesti irti anturista, jottei koetuloksissa esiintyisi alkujännityksiä, vaan jännitys ja voimat syntyisivät kokeessa kitkan estämän lämpölaajenemisen seurauksena.



Kuva 38: Putkikannatin. Putken päällä kannattimen kohdalle asetettu lisäpaino. Vasemmalla puolella teipillä putkeen kiinnitetty lämpömittari. Oikealla kannattimen liikettä seuraava mittakello. Mittalaitteet on kytketty tietokoneeseen datakaapelin välityksellä.

Kokeessa mitattiin putken pinnan lämpötilaa viidestä pisteestä. Lisäksi mitattiin putkeen menevän ja putkesta poistuvan veden lämpötilaa. Jokaisen putkikannakkeen liikettä seurattiin mittakellolla kannattimen pohjalevyn läheisyydestä. Kaikki edellä mainittu mittaustieto siirrettiin reaaliajassa mittauslaitteilta tietokoneelle, johon tulokset tallentuivat. Voima-anturin mittaustietoa ja lämpötilaa voitiin tarkkailla myös kokeen aikana. Yksittäinen lämmityskoe kesti noin 2 tuntia, mittaustuloksia lämpömittareilta, siirtymäkelloilta ja voima-anturilta rekisteröitiin sekunnin välein.



Kuva 39: Mittaustulosten tallennukseen ja tarkkailuun käytetty tietokone vasemmalla.

Lämmityslaitteisto oikealla puolella.

Lämmityskokeiden lisäksi tutkittiin kitkaa myös vetämällä sekä yksittäisiä kannattimia, että koko putkea kannattimineen täysin lämmityskoetta vastaavassa tilanteessa alustaa pitkin.

Yksittäisten kannattimien vetokokeessa käytettiin pientä mekaanista jousivaakaa, jonka avulla sekä punnittiin kannattimen paino, että suoritettiin vetokoe. Koko putkisysteemin vetokokeessa käytettiin vetovoiman mittaamiseen soveltuvaa voima-anturia, joka oli kytketty tietokoneeseen. Vetokokeessa voima-anturin ja siirtymäkellojen mittaustuloksia rekisteröitiin millisekunnin välein.

Varsinainen koe suoritettiin käsin, eli vetämällä mahdollisimman tasaisesti voima-anturiin kiinnitetystä ketjusta, kunnes putki lähti liikkeelle.



Kuva 40: Koejärjestely vetokoetta varten. Voima-anturi liitetty tietokoneeseen.

5.2 Koetulokset

Kahdella liukukannattimella tuetulle putkelle lämmityskoe tehtiin kahdesti. Mittaustulokset tilanteesta ja kokeiden tuloksista on taulukoitu alla. Putken kokonaispituus oli noin 5030 mm, vetokoe suoritettiin voima-anturilla. Taulukossa esitetty vetokokeen tulos on vedon aikana saatu huippuarvo.

Taulukko 5.1 Koetulokset kahdella kannattimella

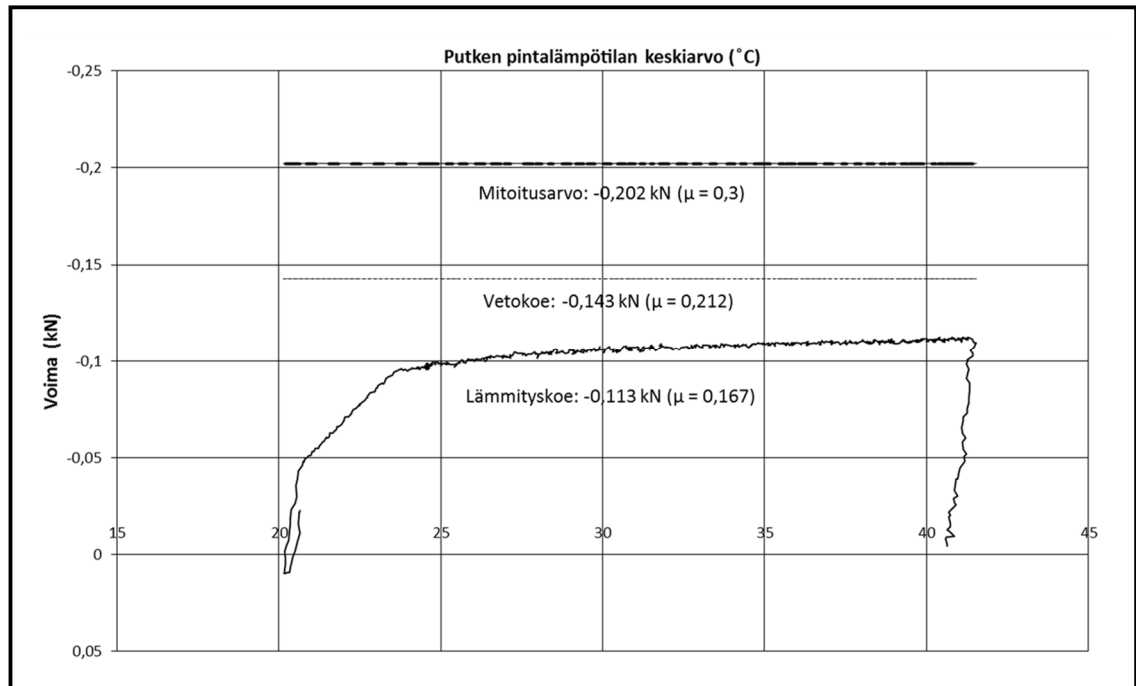
Tuen numero	Etäisyys anturista (mm)	Pystykuorma (N)	Laskennallinen mitoitusvoima (N) [$\mu = 0,3$]
1	623	314,4	94,3
2	4487	359,6	107,9
Yhteensä:		674,0	202,2
Koetulokset		Kokonaisvoima (N)	
Vetokokeen tulos		142,7	
Lämmityskokeen 1 suurin arvo		112,7	
Lämmityskokeen 2 suurin arvo		175,0	

Seuraavan sivun kuvaajissa on kahden tuen lämmityskokeessa esitetty kiintopisteeltä mitatun voiman kehittyminen suhteessa lämpötilan kasvuun. Vertailuna on kuvaajaan 41 piirretty myös laskennallinen mitoitusvoima, sekä vetokokeen huippuarvo. Käyrästä on erotettavissa kulmapisteet, joissa voiman muutosnopeus muuttuu äkillisesti kun kitkavoima ylittää suurimman arvonsa yksittäisellä tuella. Käyrän perusteella vaikuttaisi siltä, että liukutuen liikkeestä huolimatta kitkavoima pysyy lepokitkan suuruisena, eikä merkittävää voiman pienenemistä liikkeen tapahtuessa synny, jolloin kappaleen 4.2 kuvaaja 23 on lähempänä totuutta kuin kuvaaja 24.

Koejärjestely on erittäin herkkä ulkoisille vaikutuksille. Esimerkiksi putken koskettaminen voiman kehittymisen jälkeen aiheutti voimakuvaajaan selkeän piikin alaspäin. Lämmityskokeen 2 kuvaajassa nähdään pudotus, jolle ei koetilanteessa tai tuloksissa ole nähtävissä mitään selvää syytä. Kun putken lämpötila tämän pudotuksen

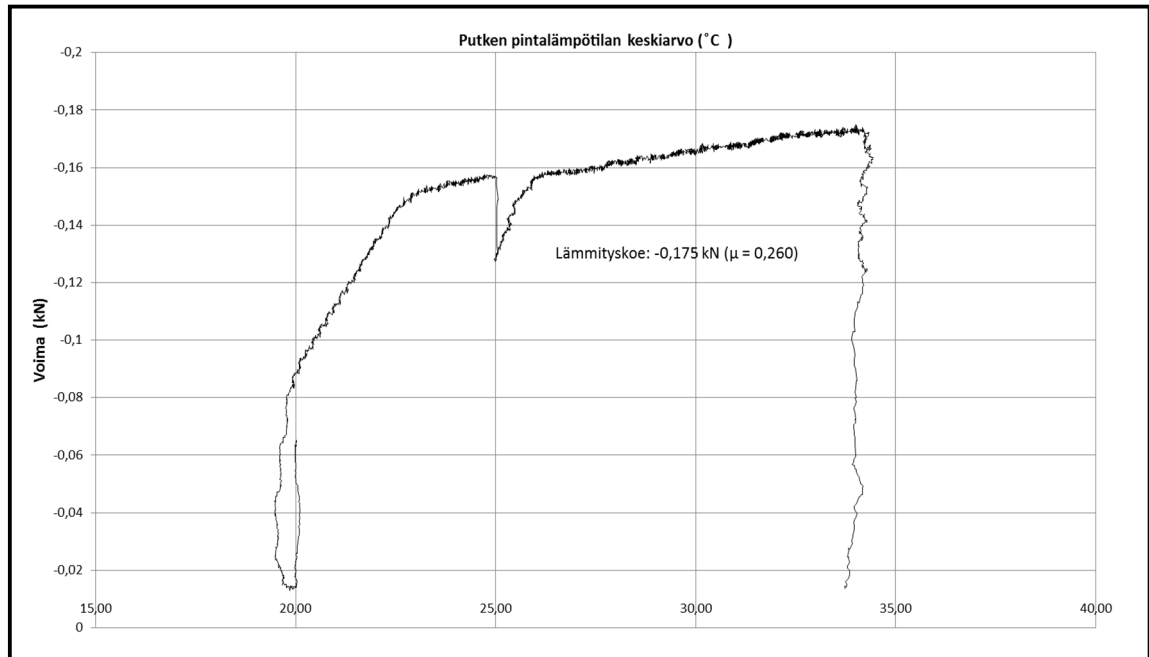
jälkeen jatkaa nousuaan palaa voimakuvaaaja takaisin ennen pudotusta alkaneelle suoralle.

Kaikissa lämmityskokeissa voiman mittaamista jatkettiin vielä lämmityksen lopettamisen jälkeen, jolloin kuvaajien lopussa nähdään voiman jyrkkä pudotus lämpölaajenemisen pysähtyessä ja vaihtuessa kutistumiseen.



Kuva 41: Kiintopistevoiman kehitys lämpötilan muuttuessa (2 kannatinta, ensimmäinen lämmityskoe) Kuvaan piirretty myös vetokokeen suurin arvo, sekä teoreettinen mitoitusarvo.

Kuvista nähdään, että noin 24 asteen paikkeilla, kun kummatkin tuet ovat jo liikkeessä, tapahtuu voimassa edelleen hiljalleen tasaantuvaa nousua. On huomioitavaa myös että lämmityskokeissa 1 ja 2 saadut tulokset poikkesivat toisistaan erittäin suuresti. Tulkintoja kokeiden tuloksista esitetään luvussa 6.



Kuva 42: Kiintopistevoiman kehitys lämpötilan muuttuessa (2 kannatinta, toinen lämmityskoe)

Neljällä liukukannattimella tuetulle putkelle lämmityskoe tehtiin kahdesti painojen kanssa ja kerran ilman ylimääräisiä painoja. Mittaustulokset tilanteesta painojen kanssa ja kokeiden tuloksista on taulukoitu alla. Putken kokonaispituus oli noin 5030 mm, vetokoe suoritettiin voima-anturilla, taulukossa esitetty arvo on vetokokeen aikana anturilta saatu huippuarvo.

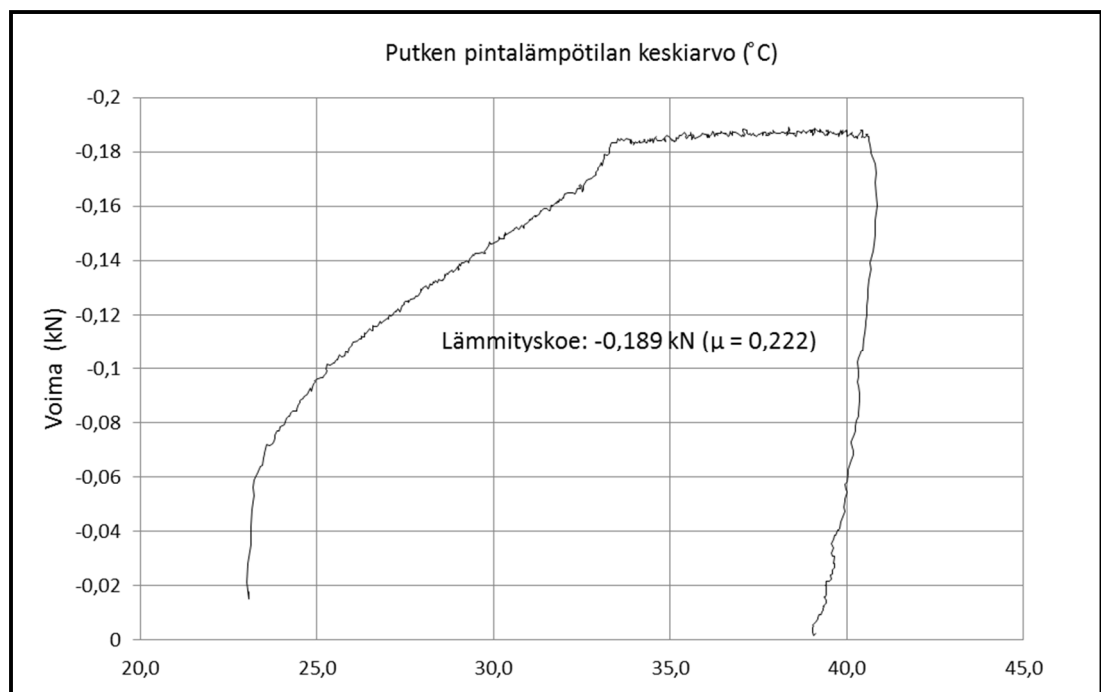
Taulukko 5.2 Koetulokset neljällä kannattimella

Tuen numero	Etäisyys anturista (mm)	Pystykuorma (N)	Laskennallinen mitoitusvoima (N) [$\mu = 0,3$]
1	623	220,6	66,2
2	2056	209,5	62,9
3	3350	153,2	46,0
4	4487	270,7	81,2
Yhteensä:		854,0	256,2
Koetulokset		Kokonaisvoima (N)	
Vetokokeen tulos		323,5	
Lämmityskokeen 1 suurin arvo		189,3	
Lämmityskokeen 2 suurin arvo		239,0	

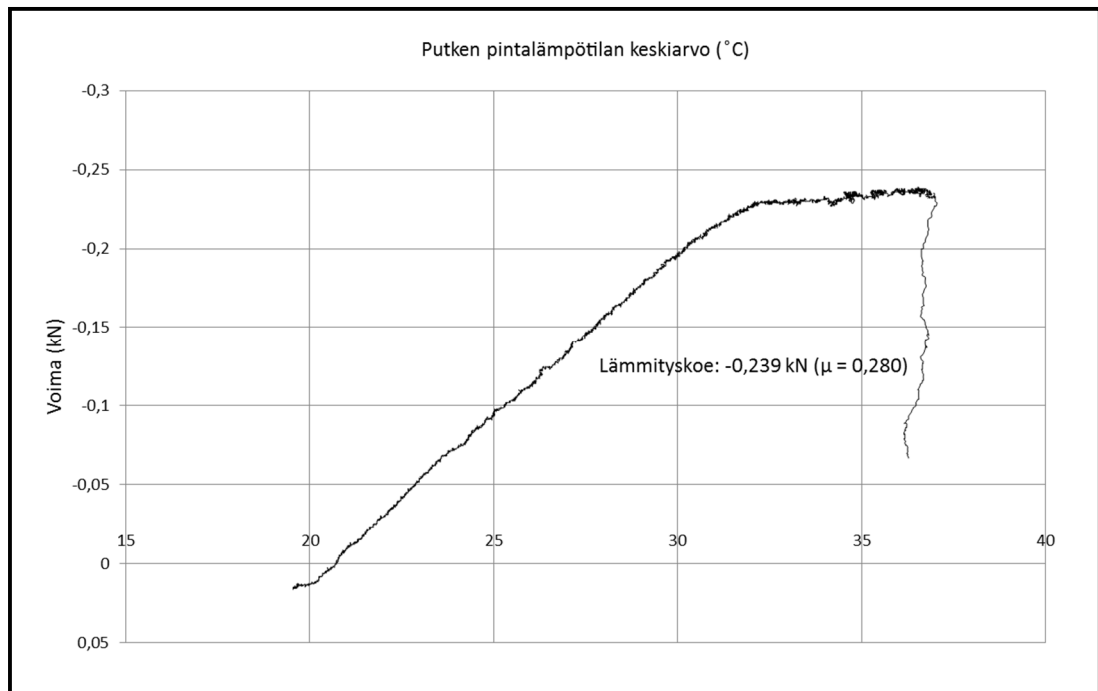
Lisäksi tehtiin vastaava mittaus ilman ylimääräisiä painoja (62 N / tuki). Tällöin kokonaispaino oli 606,0 N, laskennallinen mitoitusvoima 181,8 N ja lämmityskokeessa saatu maksimiarvo 142,7 N. Ilman painoja olevalle putkelle ei vetokoetta suoritettu.

Oheisessa kuvassa 43 on neljällä kannattimella lämmityskokeessa 1 mitattu voiman kehittyminen suhteessa lämpötilan kasvuun. Yksittäisten kannattimien liikkeiden erottaminen neljän kannattimen tapauksissa on kahden kannattimien tilannetta vaikeampaa. Lopputilanne, jossa kaikki tuet ovat lähteneet liikkeelle ja voima tasaantuu, erottuu tässä selvästi.

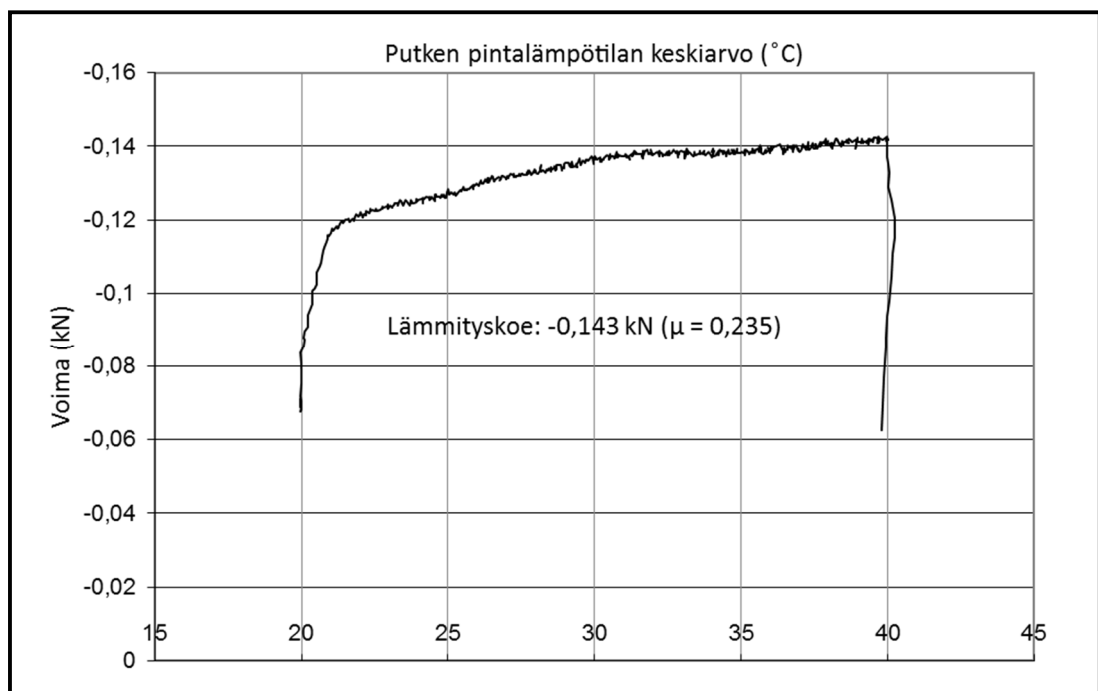
Lämmityskoe 2 neljällä kannattimella eroaa tulokseltaan suuresti lämmityskokeen 1 tuloksesta. Lämmityskokeen 2 kuvaaja (Kuva 44) eroaa kaikista muista lämmityskokeen kuvaajista myös muodoltaan. Kuvaajan alussa ei ole jyrkkää nousua, vaan voiman kehitys kokeen aikana on tasaista ennen voiman kasvun tasaantumasta noin 33 asteen kohdalla.



Kuva 43: Kiintopistevoiman kehitys lämpötilan muuttuessa (4 kannatinta, ensimmäinen lämmityskoe)



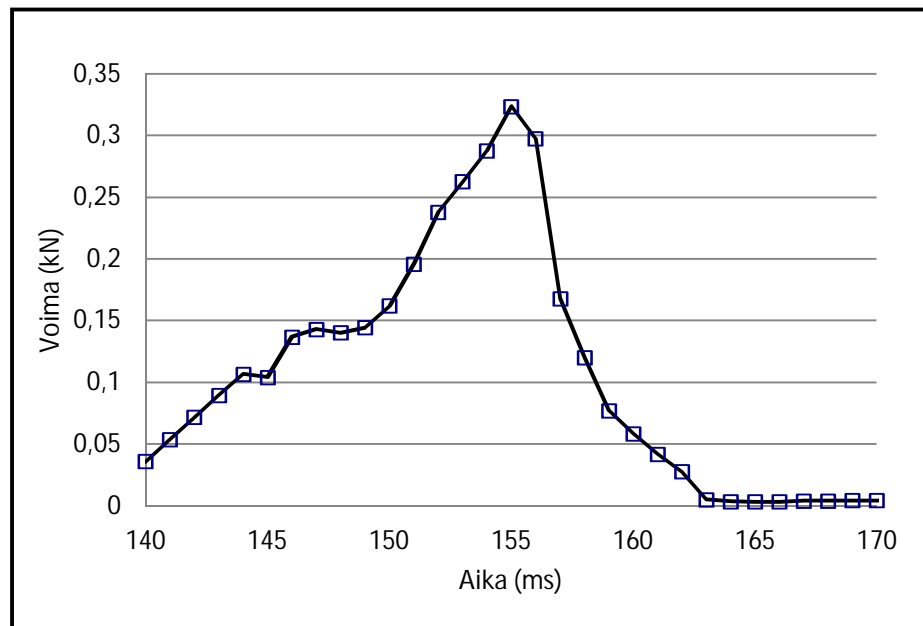
Kuva 44: Kiintopistevoiman kehitys lämpötilan muuttuessa (4 kannatinta, toinen lämmityskoe)



Kuva 45: Kiintopistevoiman kehitys lämpötilan muuttuessa (4 kannatinta, mittaus ilman ylimääräisiä painoja)

Edellä kuvattujen lämmityskokeiden lisäksi tutkittiin kitkaa myös vetämällä kannattimia alustaa pitkin. Vetokokeissa saatu mittausdata antoi suuruudeltaan hyvin vahvasti poikkeavia arvoja eri mittauskerroilla. Voima-anturin suhteellisen hidas päivitysnopeus verrattuna kappaleen liikkeellelähdon äkillisyyteen tekee kyseisestä

mittauksesta epäluotettavan. Yksittäisten liukutukien ja alustan välillä pienellä jousivaa'alla mitaten kitkakertoimen todelliseksi arvoksi saatiin 0,25-0,30 olevia arvoja. Voima-anturilta saatu tulos neljän liukukannattimen tapauksessa oli 0,38 eli varsin suuri, kahden kannattimen tapauksessa kitkakertoimen arvoksi saatiin vetokokeessa 0,21.

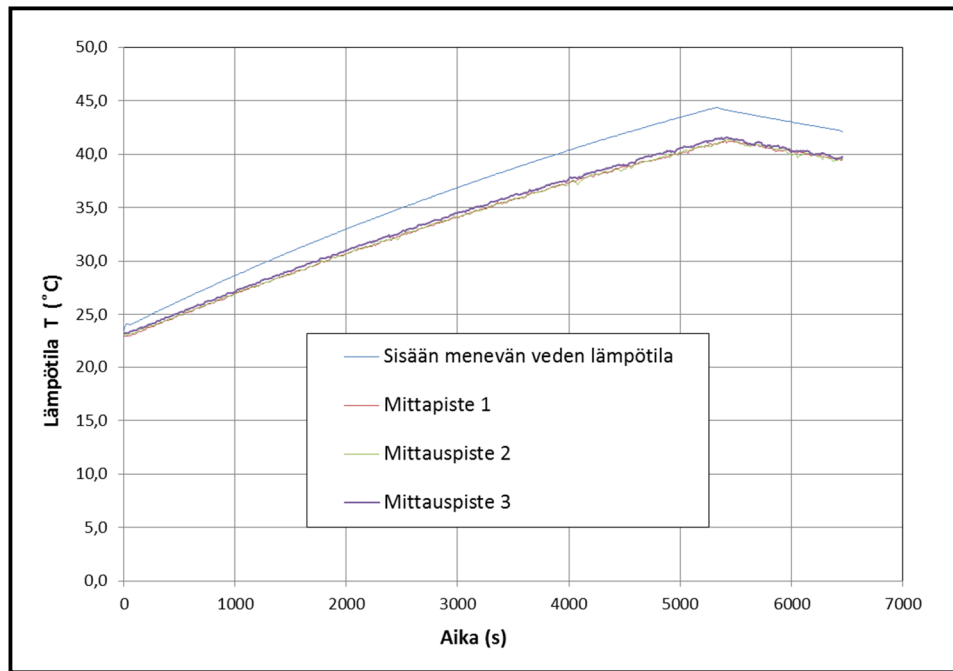


Kuva 46: Voima-anturilta saatuja arvoja vetokokeessa (huippuarvo 323,5 N)

Varsinaisten koetulosten lisäksi erityisesti lämmityskokeista saatiin runsaasti muuta tietoa kokeiden aikana tapahtuvista ilmiöistä. Sekä sisään menevän veden lämpötila, että putken pinnalta mitattu lämpötila oli kaikkien lämmityskokeiden aikana aidosti nouseva, eli esimerkiksi kuvassa 42 esiintyvä voiman äkillinen putoaminen ei selity lämpötilan laskulla sisään menevässä vedessä tai putken pinnalla.

Oheisessa kuvassa 47 on esitetty putken sisään menevän veden lämpötilan ja putken pinnalta mitattujen lämpötilojen kehitystä 4 kannattimella tehdyn ensimmäisen lämmityskokeen aikana. Lämpötilan noustessa putken ja sitä ympäröivän ilman lämpötilaero kasvaa, jolloin putki menettää lämpöään ilmaan nopeammin. Putken lämpötila siis nousee putkeen syötetyn veden lämpötilaa hitaammin, mikä näkyy kuvaajassa pinnan lämpötilan pienempänä kulmakertoimenä. Lämpötilan kehitys ei putken pinnalla ole yhtä tasainen kuin putkea lämmittävän veden lämpökehitys.

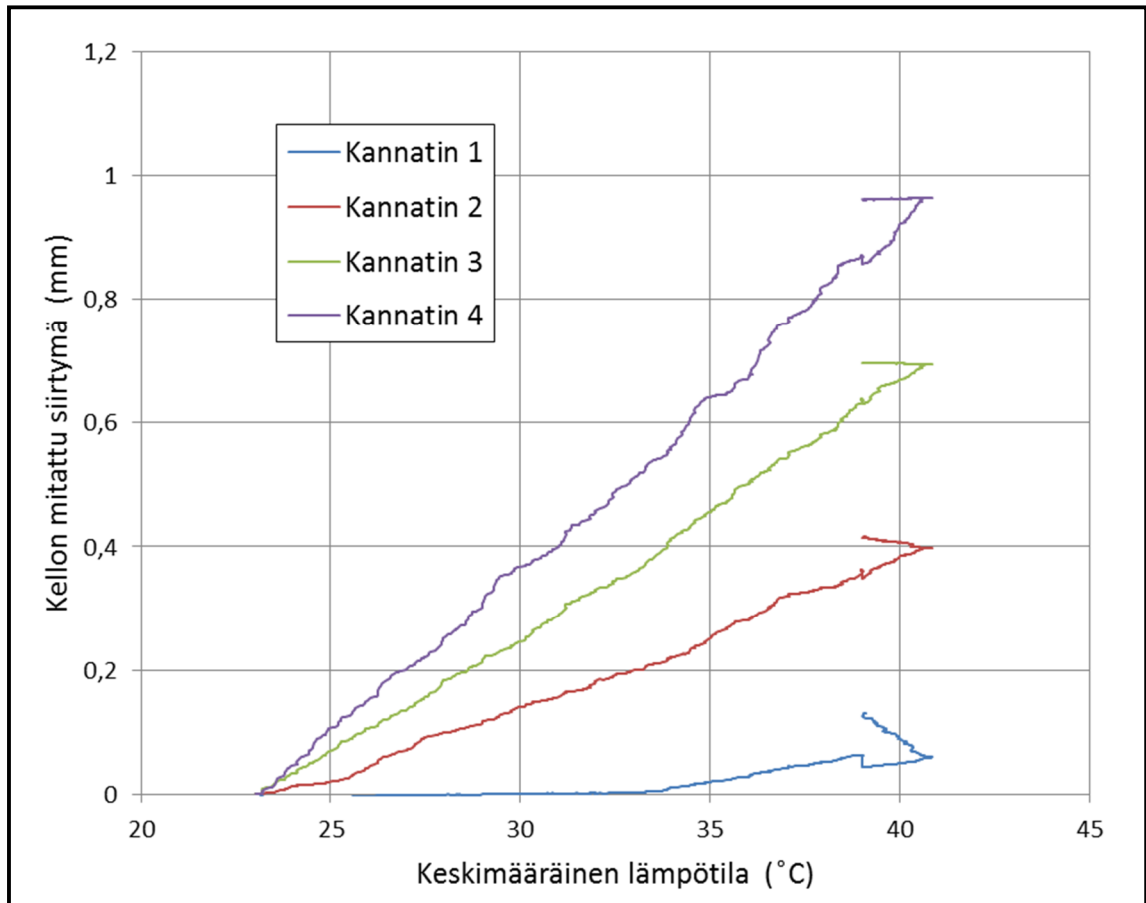
Kun putkessa kiertävän veden lämmittäminen katkaistaan ja putkeen menevän veden lämpötila laskee, alkaa myös putken lämpötila laskea. Viive veden lämpötilan huippuarvon ja putken pinnalta mitattujen lämpötilojen keskiarvon huippuarvon välillä on noin 80 sekuntia.



Kuva 47: Lämpötilan kehitys putkea lämmittävissä vedessä, sekä putken pinnalla

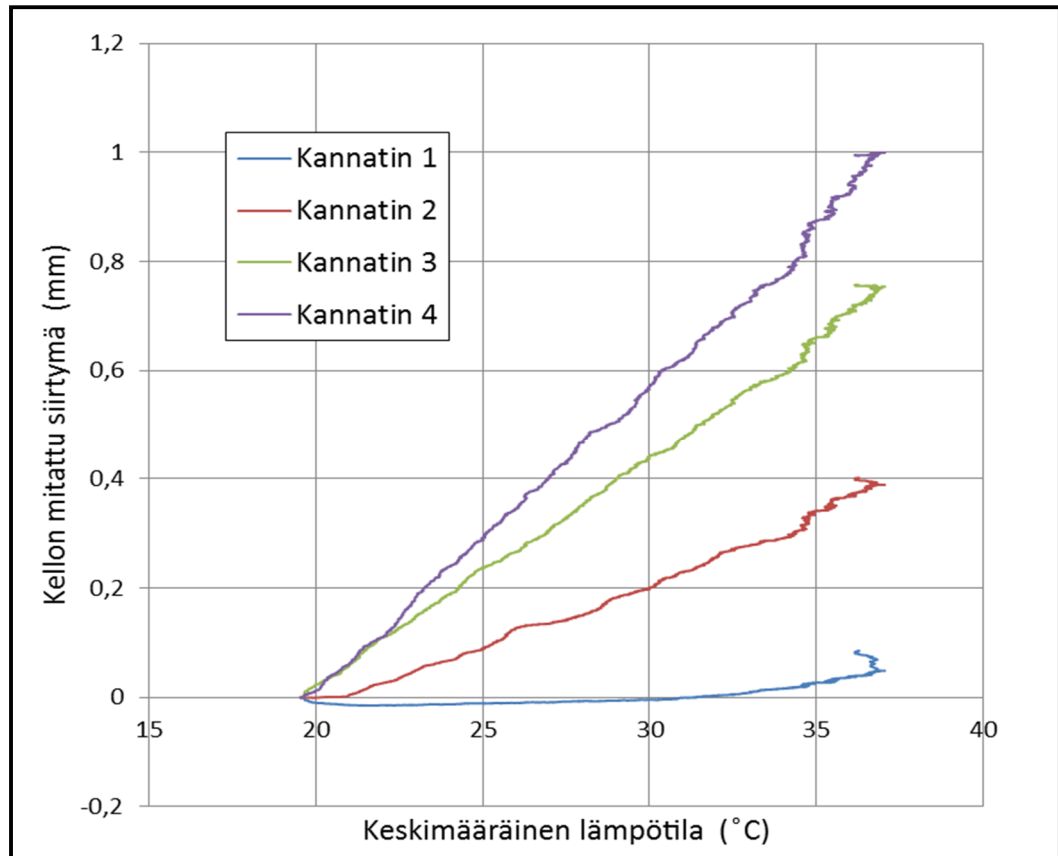
Siirtymäkelloilla saatujen mittaustietojen perusteella voidaan tarkastella kannattimien liikettä lämmityskokeen aikana. Kuvaajassa 48 nähdään 4 kannattimella tehdyn ensimmäisen lämmityskokeen aikana tapahtuneet liukukannattimien liikkeet. Tasainen alkujakso, jossa kannatin taipuu ennen kitkavoiman ylittymistä ja liikettä nähdään selvästi oikeastaan vain ensimmäisen kannattimen tapauksessa. Vertaamalla kannattimien liikettä ja voiman kehitystä kiintopisteellä (kuva 43) nähdään että kannattimen 1 liikkeelle lähtö ja voiman tasaantuminen osuvat lähelle samaa ajankohtaa.

Lämmityksen loputtua alkaa putki kutistua. Kuvaajasta voidaan nähdä että kannatin 4 muodostuu jäähtymisvaiheessa kiintopisteeksi, jonka suhteen putki kutistuu ja muut kannattimet liikkuvat. Kannattimessa 4 vaikutti kokeessa suurin pystykuorma.



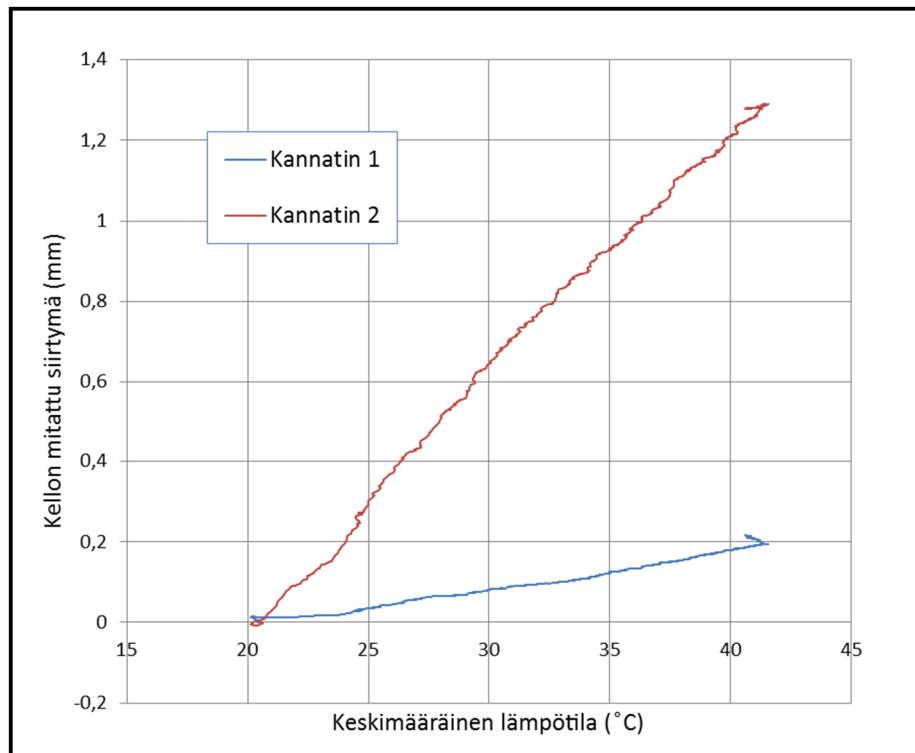
Kuva 48: Kannattimien siirtymät lämpötilan muuttuessa (4 kannatinta, ensimmäinen lämmityskoe)

Tarkastellaan vastaavasti myös toisessa lämmityskokeessa tapahtuneita kannattimien siirtymiä. Kiintopisteelle syntyvien voimien kehitys tässä kokeessa erosi muiden kokeiden tuloksista huomattavasti (kuva 49). Kannattimien liikkeissä on nähtävissä että kannatin 1 liikkuu alussa vastakkaiseen suuntaan ja kannatin 2 pysyy paikallaan. Kannattimien 2 ja 3 liike on kuvaajan perusteella yhtä nopeaa muutamien ensimmäisten asteiden ajan. Jäähdytysvaiheen osalta kannattimien liike vastaa ensimmäisen kokeen käyttäytymistä. Suhteessa kokeessa tapahtuneeseen lämpötilan muutokseen kannattimien kokonaisliikkeet olivat eri kokeissa hyvin lähellä toisiaan.

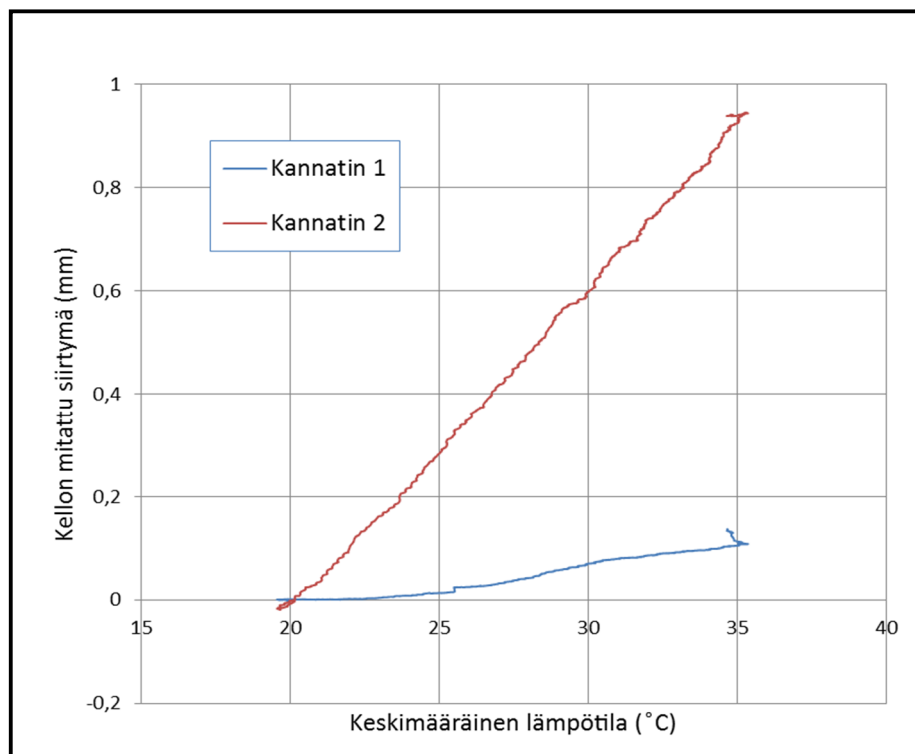


Kuva 49: Kannattimien siirtymät lämpötilan muuttuessa (4 kannatinta, toinen lämmityskoe)

Kannattimien siirtymät kahden kannattimen lämmityskokeissa on esitetty oheisissa kuvissa 50 ja 51.



Kuva 50: Kannattimien siirtymät lämpötilan muuttuessa (2 kannatinta, ensimmäinen lämmityskoe)



Kuva 51: Kannattimien siirtymät lämpötilan muuttuessa (2 kannatinta, toinen lämmityskoe)

6 TULOKSET

Suoritetun kokeellisen tutkimuksen perusteella, erityisesti kuvaajien muotoa teoriassa esitettyihin kuvaajiin verraten on nähtävissä että nykyisin käytetty tapa laskea peräkkäisten liukukannattimien kitkavoimat yhteen on oikean suuntainen. Kokeiden määrän ja luonteen, sekä tulosten suuren hajonnan huomioon ottaen ei ole mahdollista sanoa vastaavatko SFS-käsikirjan 107 (2005) standardissa SFS 5361 esitetyt liukukannattimen kitkakertoimet todellisuutta. Kokeiden perusteella arvot vaikuttavat suuruusluokaltaan oikeilta, eikä mitoitusarvoja suurempia tuloksia tehtyjen viiden lämmityskokeen saatu, mikä viittaisi hyvissä olosuhteissa kitkakertoimen laskennallisen arvon olevan turvallisen suuri.

Ero käytetyn mitoitusarvon ja kokeiden tulosten kanssa ei ole riittävän suuri, jotta sen perusteella olisi perusteltua esittää lämpöliikkeestä syntyvälle voimalle täysin kehittynyttä kitkavoimaa pienempää arvoa. Kokeissa mitatuissa tuloksissa esiintyi suurta vaihtelua ja muutamissa kokeissa voiman ja siirtymien kehitys erosi selvästi muiden kokeiden tuloksista sekä teoriassa esitetystä voiman kehityksen periaatteesta. Suurin syy kokeissa esiintyneeseen suureen vaihteluun olivat koetilanteessa toteutuneet pienet siirtymät ja voimat, jolloin olosuhteissa tapahtuvat pienetkin muutokset ja ulkoiset ilmiöt vaikuttivat näkyvästi mittaustuloksiin.

Pieniä olosuhdemuutoksia ovat liukupinnan laadun vaihtelu palkin eri kohdissa ja eri ajankohtina esimerkiksi pinnan vaihtelevasta epäpuhtaudesta johtuen. Neljällä kannattimella toisessa lämmityskokeessa saadut poikkeavat tulokset voiman kehityksessä viittaisivat kannattimen nro. 2 muita korkeampaan kitkakertoimeen, joka aiheutti kannattimen hetkellisen jumittumisen ja muita tasaisemman kokonaisvoiman kehityksen.

Kahdella kannattimella suoritetussa toisessa lämmityskokeessa voimassa esiintyi hetkellinen pudotus, jolle ei koetilanteessa ollut nähtävissä selitystä. Lämpötilan kehityksessä putken pinnalla tai putkessa kulkevassa vedessä ei ollut voiman jyrkkää muutosta selittävää vaihtelua. Mittakellojen liikkeen perusteella voiman putoaminen ja kannattimessa nro. 1 tapahtunut äkillinen siirtymä ajoittuu samaan hetkeen, tämä viittaisi kannattimen kitkakertoimen hetkelliseen laskuun. Vastaavia voimassa tapahtuneita piikkejä syntyi mikäli laitteistoon koskettiin kokeen aikana, joka johti yhden aloitetun kokeen hylkäämiseen. On mahdollista että piikki syntyi jostain huomaamattomasta tärähdyksestä tai esim. putkessa kulkevan veden virtauksen muutoksesta. Myös putken ja kannattimen välisen kiinnityksen pieni luistaminen selittäisi voiman käyttäytymisen. Toteutunut siirtymä oli mikrometriluokkaa, eikä siten koetilanteessa nähtävissä.

Kaikissa lämmityskokeissa voiman suuruus tasaantui kokeen loppupuolella. Kaikkien tukien lähdettyä liikkeelle voiman nopea kasvu loppui ja kasvu jatkui tämän jälkeen hitaasti. Hitaan kasvun aikana voiman kasvu hidastui jatkuvasti, muttei pysähtynyt täysin yhdessäkään kokeessa.

Kokeen lopussa tapahtuvan hitaan kasvun syytä on vaikea arvioida. On mahdollista että palkin pinnan pienet epäpuhtaudet kertyvät liukutuen etureunaan tuen liikkeessa eteenpäin ja nostavat hiljalleen liukutuen kitkavoimaa. Putken lämpölaajeneminen aiheuttaa putken ja putkikannattimen välisen liitoksen kiristymistä, joka jäykistää kannatinta ja voi näkyä voiman kasvuna. Voima rakenteessa jakautuu uudestaan osittain myös putken pituuden kasvaessa ja vaikka voima-anturin tavoite oli mitata ainoastaan vaakavoimia, voi anturin ja putken päään välisen kitkan seurauksena mittaustulokseen siirtyä vähäisessä määrin myös pystysuuntaista voimaa.

Kokeessa mitatun voiman vaihtelut kokeen loppuvaiheessa olivat luokkaa 0,1 N. Näin pienet voiman muutokset ovat alttiita mittausvirheille ja pieni arvojen heittely, joka näkyy kuvaajien sahalaitaisuutena johtuneen mittauslaitteistoon nähden liian pienistä voimista. Yleinen käyrien muoto ja pitkäaikaiset suunnat arvojen kehityksessä ovat kuitenkin luotettavia ja nähtävissä selvästi kuvaajista. Mikäli kokeita suoritettaisiin suuremmilla ja pidemmillä putkilla, voitaisiin siirtymät ja voimat saada riittävän suuriksi, jotta mittausepäätarkkuudesta johtuva häiriö, sekä olosuhteiden pienien muutosten ja ulkoisten ilmiöiden vaikutukset saataisiin eliminoitua tai ainakin niiden merkittävyys koetuloksiin pienenesi. Tällaisen koejärjestelyn suorittaminen olisi kuitenkin työlästä ja kallista, eikä lopulta vastaisi tilannetta todellisessa putkisiltarakenteessa.

Mikäli putkiston aiheuttamien lämpökuormien kokeelliseen määrittelyyn päädytään tulevaisuudessa, tulisi mittaukset suorittaa todellisissa rakenteissa. Mittauksessa tulisi ottaa huomioon myös kiintopisteen joustaminen siten että voimia mitattaisiin kiintopisteenä toimivan kannattimen ja putkisillan liitoksesta.

Laskennallisen tutkimuksen perusteella kannattimien ja sillan joustamisella on vaikutusta lämpökuorman suuruuteen. Tarkastelemalla joustavan kannattimen välittämää kuormaa ja sen suhdetta kuormiin joita saadaan kun joustaminen ja muu kannattimien liike jätetään huomiotta voidaan nähdä että tulosten ero voi olla merkittävä (ks. Liite 1)

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Nykyisin käytetty tapa laskea täydet lepokitkavoimat yhteen on oikea ja suositeltava niiden rakenneosien osalta joissa voimien kumoutumista ei tapahdu. Liukukannakkeita kannatteleviin palkkeihin vaikuttava vaakavoima tulee laskea kaikkien palkilla olevien liukukannattimien pystytukireaktioiden ja kitkakertoimen tulona. Lepo- ja liukukitkan erotuksella ei kokeiden perusteella ole kitka- ja kiintopistevoimia pienentävää vaikutusta.

Reunapalkkien osalta on samoin laskettava täysi voima sen mukaan miten voimaa voi pahimmillaan liukukannattimilta palkeille siirtyä. Sillan kiintopisteen sijoittaminen keskelle siltalohkoa pienentää reunapalkkien kuormitusta ja pienentää myös sillan omasta lämpöliikkeestä aiheutuvaa pilareiden taipumaa, sekä lämpöliikkeestä aiheutuvaa voimaa.

Joustamisen huomioinnilla on merkitystä voimien suuruuteen. Koska putkiston joustoraportissa saadut arvot ovat turvallisella puolella voidaan niitä käyttää sellaisenaan, mikäli arvot ovat suuruusluokaltaan sellaisia, ettei putkisillan tai muiden putkistoa tukevien rakenteiden suunnitteluun aiheudu merkittäviä ongelmia. Jos putkiston joustoanalyysi tai muu putkiston lämpökuorman laskenta antaa kohtuuttoman suuria kuormituksia sillalle, voidaan voimia pienentää tekemällä putkiston kannatusjärjestelmään muutoksia. Voimia pienentäviä toimenpiteitä ovat erityisesti seuraavat:

- Rakennesuunnittelija voi ehdottaa putkisillan ohjatun liukukannattimen muuttamista tavalliseksi liukukannattimeksi.
- Rakennesuunnittelija voi ehdottaa kiintopisteen siirtämistä edullisempaan paikkaan.
- Rakennesuunnittelija voi ehdottaa jonkin voimaa pienentävän ratkaisun käyttöä.

Voimia pienetävien ratkaisujen, kuten riippukannattimien, rullakannattimien, aluslevyjen ja tasainten käytöstä, sekä putkistojen muuten voimien kannalta edullisemmasta muodosta päättää putkisto- sekä muu prosessisuunnittelu. Näiden käytöstä on etua lämpöliikkeestä syntyvien voimien vähentämiseksi, mutta koska suunnittelu voi olla putkiston osalta jo edennyt pitkälle rakennesuunnittelun alkaessa ei näiden käyttö ole yleensä mahdollista.

Koska ohjattu ja ohjaamaton liukukannatin ovat keskenään samanlaisia ja ohjauksessa käytettävät kynnet suunnitellaan siltarakenteeseen vasta

rakennesuunnittelussa on ohjauksen poistaminen kannattimesta, johon muuten aiheutuu suuri ohjausvoima yleensä mahdollista. Esimerkiksi luvun 4.2.1 tapauksessa päädyttiin ohjauksen poistamiseen, jolloin ongelmia tuottanut sivuttaisvoima putosi noin kolmeen prosenttiin alkuperäisestä.

Voimia voidaan saada pienenettyä myös ottamalla laskennassa huomioon kannattimien ja muun rakenteen muodonmuutokset. Tarkempaan tulokseen voidaan päätyä seuraavilla menetelmillä:

- Rakennesuunnittelija voi määrittää putkistolta siirtyvät voimat mallintamalla putket lämpökuormineen omaan laskentamalliinsa niiltä osin kun ne aiheuttavat kuormituksia putkisillalle.
- Putkistolaskija voi mallintaa omaan laskentamalliinsa siltarakenteita tai ottaa FEM-mallin tukiehdoissa huomioon kannattimien ja siltarakenteen joustaminen eli tuen jousivakio.
- Rakennesuunnittelija voi tarkastella ongelmia aiheuttavaa kannatinta ja laskea millaisia voimia kannatin voi todellisuudessa siltarakenteelle välittää.

Liitteen 2 laskelma on esimerkki jälkimmäisestä menetelmästä. Menetelmä soveltuu tapauksiin, joissa jokin voima tai momentti on poikkeuksellisen suuri verrattuna muiden kannattimien välittämiin voimiin ja voidaan olettaa että kyseinen tulos on kaukana todellisuudesta. Yksittäisen kannattimen analysoinnissa tulee huomioida, että yhden kannattimen joustaminen jakaa voimia uudelleen, jolloin muiden kannattimien välittämät voimat voivat kasvaa. Menetelmä on siten käyttökelpoinen mikäli suuren voiman aiheuttamat ongelmat ovat paikallisia.

Kaksi ensimmäistä vaihtoehtoa soveltuvat paremmin koko siltakokonaisuuden tarkempaan laskentaan. Jotta putkiston ja rakenteiden käyttäytyminen joustotilanteessa tulisi huomioitua laskentamallissa mahdollisimman totuudenmukaisesti tulisi suunnittelijoiden mahdollisuuksien mukaan keskustella tilanteesta käytettävästä menetelmästä. Putkistolaskennan käytäntö eroaa rakennesuunnittelusta, joten rakennesuunnittelijan laskemien siltaa kuormittavien voimien suuruudella ei ole käyttöä putkistosuunnittelussa.

Luvussa 3.2.4 esitetyt ulkomaisten yhdistysten ja yritysten sisäiset putkisiltojen suunnitteluohjeet eivät perustele ohjeissa käytettyjä menettelyjä tai arvoja, joten niiden käyttökelpoisuutta tai luotettavuutta ei voida arvioida. Voidaan olettaa että yllä kuvattujen voimia pienentävien ilmiöiden vuoksi ohjeiden avulla voidaan saada käytännössä toimivia rakenteita, mutta menetelmien karkeuden vuoksi näin mitoitettujen rakenteiden luotettavuudessa on suurta vaihtelua.

LÄHTEET

Abu-Adas, Hisham. Best Practice: SABP-007 Steel Piperack Design
Saudi Arabian Oil Company: Saudi Aramco, 2002. 51 s. [Viitattu 8.10.2012]
Saatavissa:
http://www.sefindia.org/forum/files/aramco_piperack_103.pdf

American Petroleum Industry (API) publications: PIP STC01015, Structural Design
Criteria. A Process Industry Practices (PIP), 2006. 32 s. [Viitattu 8.10.2012] Saatavissa:
<http://www.scribd.com/doc/47628945/PIP-STC01015-Structural-Design-Criteria>

Richard M. Drake, Robert J. Walter. Walsworth : Engineering Journal — 4th Quarter
2010: Design Of Structural Steel Pipe Racks. 12 s. [Viitattu 8.10.2012] Saatavissa:
http://www.sefindia.org/forum/files/design_of_structural_steel_pipe_racks_115.pdf

Drake, Richard. Sähköpostiviesti, 2012.

Henell, Antti: Kannakoinnin merkitys prosessiputkistojen suunnittelussa. Opinnäytetyö.
Jyväskylän Ammattikorkeakoulu, paperikoneteknologian koulutusohjelma, 2011. 66 s.

Hiltunen Marko. Puhelinhaastattelu, 28.5.2012

ISO 12494:2001 Atmospheric icing of structures, 2001.

Kesti, Marko: Teollisuusputkistot. VAPK-kustannus, Helsinki, 1992. 143 s.

Kesti, Marko: Putkisiltojen suunnitteluohjeet ja –järjestelmä. Diplomityö, Oulun
Yliopisto, konetekniikan osasto, 1991. 85 s.

Korhonen, Tapani: Teollisuusputkistojen sijoitussuunnittelu. Tutkintotyö, Tampereen
Ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikka, 2006. 45 s.

Lilja, Heikki. Sähköpostikeskustelu 2012. (Heikki Lilja, Juhani Hyvönen ja Anssi
Laaksonen)

Lisega SE tuotekuvasto (catalog product group 5) [Viitattu 12.6.2012] Saatavissa:
http://www.lisega.com/pdf/pg5_us.pdf

NCCI 2, Liikenneviraston ohjeita 13/2012: Eurokoodin soveltamisohje,
Betonirakenteiden suunnittelu. 110 s. [Viitattu 16.4. 2013] Saatavissa:
http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2010-24_ncci2_web.pdf

RTM Engineering : Example, 2012. 42 s. [Viitattu 8.10.2012] Saatavissa:
http://www.sefindia.org/forum/files/piperack_design_example_856.pdf

SFS-EN 13480-3 Metallic industrial piping. Part 3: Design and calculation, 2013

SFS-EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet, 2009

SFS-EN 1991-1-3: Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat.
Lumikuormat, 2004

SFS-EN 1991-1-4: Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat.
Tuulikuormat, 2005

SFS-EN 1991-1-5: Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-5: Yleiset kuormat.
Lämpötilakuormat, 2009

SFS-EN 1993-1-1 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt
ja rakennuksia koskevat säännöt, 2005

SFS-Käsikirja 107. Putkiston kannatus, 2005. 324 s.

KUVALÄHTEET

- [1] Mixing Systems, Inc. [Viitattu 18.11. 2012] Saatavissa:
<http://mixing.com/site/photo-gallery/66-expansion-joints>
 U.S. Bellows, Inc. Metallic expansion joint catalog [Viitattu 18.11. 2012]
 Saatavissa: <http://www.usbellows.com/expansion-joint-catalog/compensator-examples.htm>
- [2] Jussi Jaakkosela (2012), termit pääosin Marko Kesti: Putkisiltojen suunnitteluohjeet ja –järjestelmä. Diplomityö, Oulun Yliopisto, konetekniikan osasto (1991)
- [3] Kymppi-Eristys Oy: Stora Enso, Langerbrugge Belgia. Talvivaara Mining Company. [Viitattu 16.4.2013] Saatavissa:
<http://www.10e.fi/files/gallery/11-05/putkisilta680x5104de34624ced87.jpg>
<http://www.10e.fi/files/gallery/1210/talvivaaraminingcompany20082506ec721d62ec.jpg>
- [4-6] Jussi Jaakkosela (2013)
- [7] Marko Kesti: Putkisiltojen suunnitteluohjeet ja –järjestelmä. Diplomityö, Oulun Yliopisto, konetekniikan osasto (1991)
- [8] Standardi SFS 5363, taulukko 2. Eristettyjen teräsputkien kannatusvälit
- [9] Vasen: Jussi Jaakkosela (2012) Oikea: Lisega SE tuotekuvasto (catalog product group 5) [Viitattu 12.6.2012] Saatavissa:
http://www.lisega.com/pdf/pg5_us.pdf
- [10] Vasen: Standardi SFS 5366, Oikea: Standardi SFS 5367
- [11] Jussi Jaakkosela (2012)
- [12] Lisega SE tuotekuvasto (catalog product group 5) [Viitattu 12.6. 2012]
 Saatavissa: http://www.lisega.com/pdf/pg5_us.pdf
- [13-14] Vasen: Jussi Jaakkosela (2012) Oikea: Lisega SE tuotekuvasto (catalog product group 5) [Viitattu 12.6. 2012] Saatavissa:
http://www.lisega.com/pdf/pg5_us.pdf
- [15] Lisega SE tuotekuvasto (catalog product group 5) [Viitattu 12.6. 2012]
 Saatavissa: http://www.lisega.com/pdf/pg5_us.pdf

[16-17] Putkiston alustava joustoraaportti, Jarmo Lindroos, Pöyry Finland Oy (2013)

[18-24] Jussi Jaakkosela (2012-2013)

[25] Putkiston alustava joustoraaportti, Jarmo Lindroos, Pöyry Finland Oy (2013)

[26] Standardi SFS 5860. Putkikannatin.

[27-51] Jussi Jaakkosela (2012-2013)

Kuvaajien 41-51 mittaustulokset Rantala Jukka, Jussi Jaakkosela (2012)

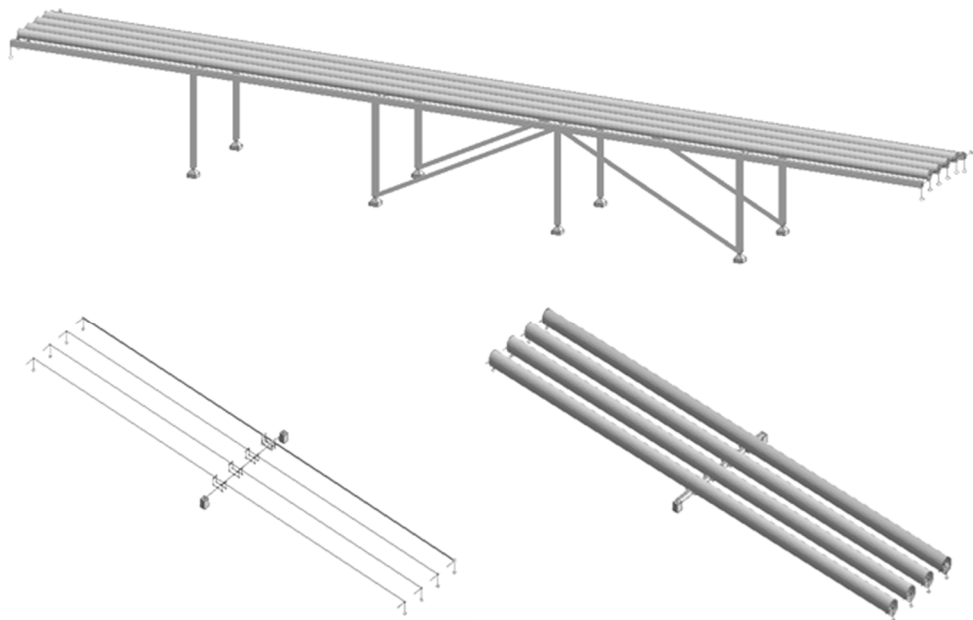
Liitteiden kuvat Jussi Jaakkosela (2012-2013)

Liite 1 : Laskelma putkikannattimien ja palkin joustosta

Tarkastellaan esimerkiksi neljää DN500 kokoista putkea, jotka on sijoitettu 4,8 metriä pitkälle palkille. Käytetään korkeaa liukukannatinta, jonka mitat on esitetty standardissa 5377. Sopiva palkki putkien kannattamiseen on esimerkiksi putkipalkki CFRHS 200x100x6 (S355J2H).

Nestetäytteisen DN500 putken sopiva kannatusväli on 10 metriä ja viivakuorma 2648 N/m. (SFS 5363, Taulukko 1). Pystysuora kuormitus yksittäiselle liukukannattimelle on siten 26,5 kN ja käyttämällä kitkakertoimena hyvien olosuhteiden kerrointa 0,30 saadaan vaakasuuntaiseksi kuormitukseksi 7,94 kN.

Oheisessa kuvassa on esitetty FEM-laskentamalli siirtymien määrittystä varten. Kuvassa ylhäällä esitetyn kokonaisen siltalohkon käsittely voidaan yksinkertaistaa alla olevaksi tapaukseksi. Kun sillan diagonaalijäykisteet mitoitetaan kestämään nurjahtamatta niihin kohdistuva aksiaalinen voima, on niissä tapahtuva muodonmuutos kyseisillä voimilla erittäin pieni suhteessa liukukannattimien ja niiden alla olevien palkkien muodonmuutoksiin.

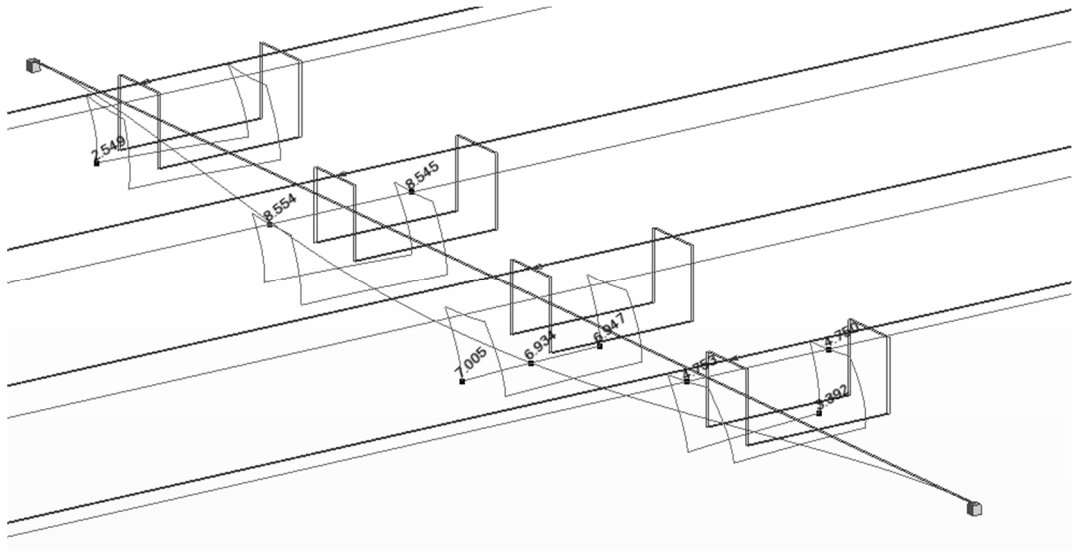


Rakennemalleja putkikannatuksen jäykkyyden määrittelyä varten.

Sijoittamalla voimat ja laskemalla ohjelmiston avulla rakenteessa tapahtuvat siirtymät saadaan tulokseksi että keskimmäisten putkien osalta voimia vastaava putken

suuntainen siirtymä on noin 8,6 mm ja reunimmaisten putkien osalta 4,8 mm. Määrittelemällä kannattimien alla oleva palkki täysin jäykäksi voidaan laskea myös pelkän DN500 liukukannattimen jousto yllä kuvatulla voimalla, joka on 2,0 mm, eli suurin osa kannatuksen joustosta aiheutui palkin joustosta.

Liukukannattimien alla olevan palkin vääntöjäykkyydellä, ei ole merkitystä kannatinpisteiden jouston kannalta, sillä itse putken jäykkyys estää palkin vääntymisen. Näin taivutusjäykkyydeltään lähes vastaavan avoprofiilin HEA160 käyttö palkkina antaa siirtymiksi vastaavassa tilanteessa saman suuntaiset arvot 8,4 mm keskimmaisille kannattimille ja 4,7 mm reunaputkille.



Visualisointi rakenteen siirtymistä.

Jouston eli voiman ja siirtymän välisestä riippuvuudesta käytetään nimitystä jousivakio k , joka määritelmän mukaan on voiman ja siirtymän negatiivinen osamäärä.

$$k = -\frac{F}{x} \quad (\text{L1.1})$$

Kuvassa 21 (kappale 4.2) jousivakion itseisarvo on suoran kulmakerroin. Esimerkiksi yllä lasketussa rakennemallissa keskimmaisille kannattimille jousivakio on:

$$k = -\frac{F}{x} = -\frac{7,94 \text{ kN}}{0,0086 \text{ m}} = -923 \text{ kN/m} \quad (\text{L1.2})$$

Pelkän DN500 liukukannattimen jousivakio on:

$$k = -\frac{F}{x} = -\frac{7,94 \text{ kN}}{0,0020 \text{ m}} = -3970 \text{ kN/m} \quad (\text{L1.3})$$

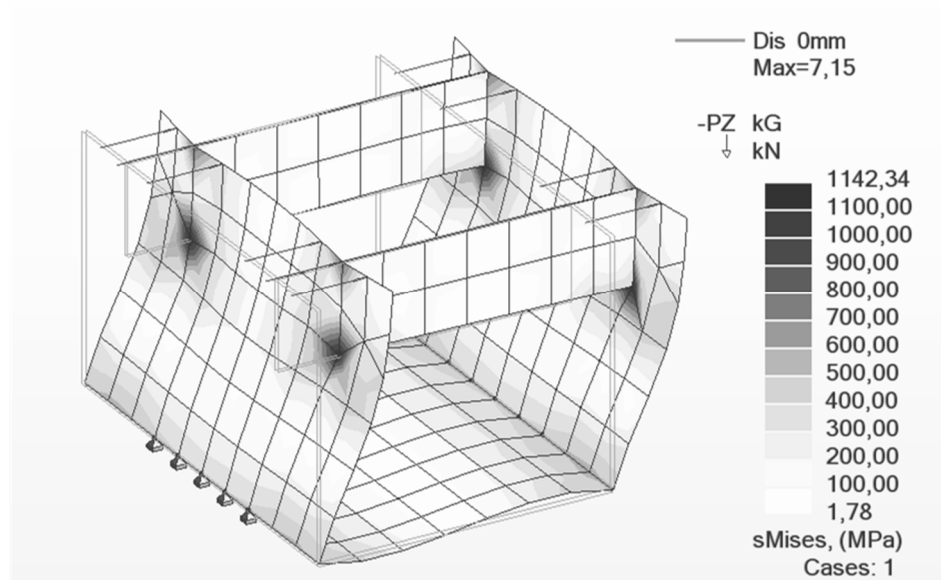
Jousivakion suuruus on vakio pienillä siirtymillä. Mikäli muodonmuutokset ovat niin suuria että rakenne alkaa toimia toisin, esimerkiksi niin että kannattimen pystysuoriin osiin tulee taivutuksen lisäksi myös vetoa kannattimen jäykkyys kasvaa. Osien nurjahtaminen tai paikallinen myötääminen vastaavasti laskee jousivakiota.

Liite 2 : Laskelma kannatinvoiman todellisesta suuruudesta

Kappaleessa 4.2.1 esitetyn esimerkin mukaiseen kannattimeen SFS 5860 DN600 (kuva 26) kohdistuu joustoraportin mukaisesti vaakavoima 220 kN.

Tarkastellaan aluksi putkikannattimen alaosa, jossa suurin osa kannattimen muodonmuutoksesta tapahtuu. Yläosan putken ympärille kiristetty putkisanka on ainevahvuudeltaan paksumpaa materiaalia ja putki itsessään on hyvin jäykkä kannattimeen verrattuna.

Oheisessa kuvassa on putkikannatin mallinnettuna kuorielementeillä. Kaikki kannattimen levytavara on 15 millistä S355J2 levyä. Voima putkisangoilta katsotaan tässä siirtyvän tasaisesti kaikkien neljän putkisangan kiinnityshitsin välityksellä ja kiinnitys ohjureihin oletetaan siirtymättömäksi niveleksi.

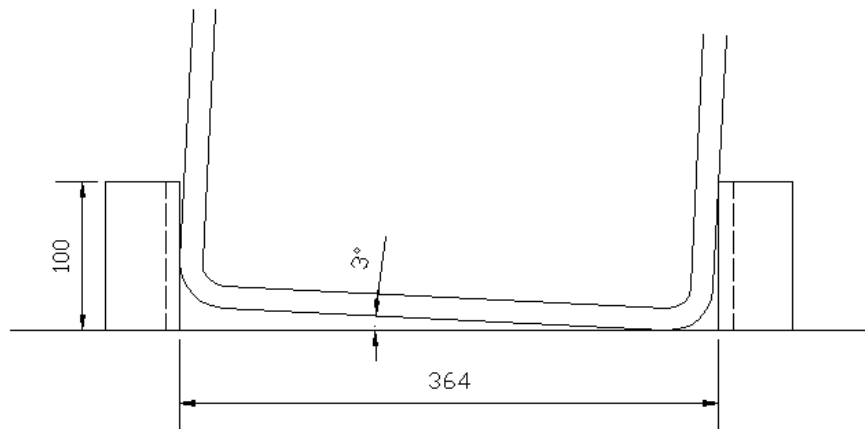


Putkikannattimen alaosan laskentamalli

Kuvan perusteella nähdään että kannatin taipuisi kyseisellä voimalla 7,15 mm. Teräksen myötöraja rakenteessa ylittyy, joten osittaisen plastisoitumisen vuoksi kannatin taipuisi laskettua enemmän. Lasketantamalli ei huomioi poikittaisten jäykistyslevyjen taipumista ja mahdollista nurjahtamista, mikä myös lisäisi kannattimen taipumaa.

Kannatin ei todellisuudessa ole tiukasti ohjureiden välissä, vaan vällys kannattimen ja ohjurin välillä on 2 mm kummallakin puolella. Putkikannatin on alaostaan 360 mm leveä. Kannatin pääsee siten kiertymään ohjurien välissä. Kun otetaan huomioon kannatetun DN600 putken keskipisteen korkeus 605 mm putkikannattimen alapinnasta voidaan laskea että putken keskipiste pääsee siirtymään

noin 31 mm, ennen kuin ohjurit rajoittavat putkilinjan sivuttaisliikettä oheisen kuvan mukaisesti.



Putkikannattimen kääntyminen ohjureitten välissä

Putkilinjan käännösten väliin jäävän osuuden pituus esimerkissä oli 6 metriä. Putkiston joustolaskelmien oletuksena oli putken 100° C lämpötilan muutos:

$$\Delta L = \alpha \Delta T L = 12 * 10^{-6} \frac{1}{K} * 100^{\circ} C * 6000 \text{ mm} = 7,2 \text{ mm} \quad (\text{L2.1})$$

Käännösten väliin jäävä putkilinjan suora osa laajenee siten 7,2 mm. Ohjurien välyksen vuoksi putkilinja pääsisi laajenemaan 62 mm ennen kuin ohjurit estäisivät kannattimen kääntymisen. Pystykuorma esimerkin kannattimella on 22 kN, joten putkikannatin kääntyessään ohjureiden välissä ja nojatessaan oikeanpuoleiseen ohjurin yläpäähän aiheuttaa vaakasuuntaisen voiman, joka suurimmillaan on kääntymisen alkuhetkellä:

$$F_z * y = F_y * z \rightarrow F_y = F_z * \frac{y}{z} = 22 \text{ kN} * \frac{180 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} = 39,6 \text{ kN} \quad (\text{L2.2})$$

Kyseinen voima on esimerkin tapauksessa ohjausvoima, joka putkikannattimelta rakenteelle enimmillään välittyy. Putken painuminen kasaan ei vaikuta merkittävästi tuloksiin.

Liite 3 : Laskelma putkisillan muodonmuutoksesta

Tilanteessa jossa diagonaalinen jäykiste myötää liukukannattimen muututtua kiintopisteeksi tulee rajoitteeksi käyttörajatilamitoitus, sekä vetosauvalle sallittavissa oleva muodonmuutos. Tyypillisen teräksisen (S355) sauvan suurin venymä kimmoisella alueella (SFS-EN 1993-1-1, 2005 Kappaleet 3.2.3 ja 3.2.6) on:

$$\varepsilon = \frac{f_y}{E} = \frac{355 \text{ MPa}}{210\,000 \text{ MPa}} = 0,169\% \quad (\text{L3.1})$$

Venymä ε

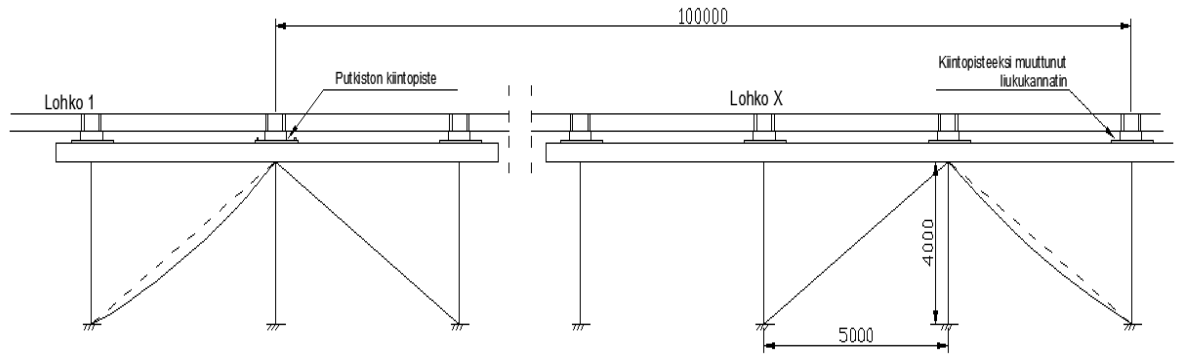
Myötölujuus f_y , MPa

Kimmokerroin E , MPa

Rakenneteräksen murtovenymän tulee saman eurokoodin osan kappaleen 3.2.2 mukaan olla vähintään 15% joka on yli 80 kertainen kimmoisen alueen venymään nähden. Kaikki kimmoisen alueen venymän ylittävät muodonmuutokset aiheuttavat rakenteeseen pysyviä muodonmuutoksia.

Tarkastellaan esimerkissä tilannetta jossa putkisillan rakenteet antavat periksi ennen liukukannattimen lepokitkan ylittymistä, jolloin liukukannatin on muuttunut kiintopisteeksi. Oletetaan oheisen putkisillan kannalta pahin tilanne, jossa putkiston kiintopisteeltä katsoen kauimmainen liukukannatin on juuttunut kiinni. Näin syntyneiden kiintopisteiden etäisyys toisistaan on 100 metriä ja putkisto on lämmennyt 100 asteella sillan lämpötilan pysyessä vakiona. Putkiston lämpöliike toteutuu sillan antaessa periksi, jolloin kiintopisteiden välinen putkiosuus pitenee 0,12 metriä:

$$\Delta L = \alpha \Delta T L = 12 * 10^{-6} \frac{1}{K} * 100 \text{ K} * 100 \text{ m} = 0,12 \text{ m} \quad (\text{L3.2})$$



Sillan liukukannatin on muuttunut kiintopisteeksi

Oletetaan aluksi että kaikki muodonmuutos tapahtuisi diagonaalisauvoissa, eli liukukannatin ja sitä kannatteleva palkki olisivat täysin jäykkiä. Putkiston painuminen kasaan jätetään tässä huomiotta. Voimat siis ylittävät diagonaalien kestävyys, jolloin puristussauvat nurjahtavat ja vetosauvat menevät myötään. Oletetaan että kummankin siltalohkon jäykisteet ovat yhtä kestäviä, jolloin kumpikin silta liikkuu 60 mm alkuperäisestä asemastaan. Vedetyn diagonaalisauvan pituus kasvaa tällöin 6,40 metristä noin 6,45 metriin eli sauva pitenee noin 0,73%. Tästä kimmoista venymää on noin 0,17 prosenttia ja plastista loput 0,56 prosenttia, joka siis jää sauvan pysyväksi muodonmuutokseksi. Suhteessa rakenneteräksen 15% murtovenymään ovat kyseiset arvot pieniä eikä vaaraa rakenteen sortumisesta ole.

Todellisuudessa joustoa tapahtuisi myös luvun 4.2 ja Liitteen 1 mukaisesti liukukannakkeissa sekä liukukannakkeita kannattelevassa palkissa, jolloin diagonaalisauvan muodonmuutos ja siltojen kokonaisliike jäisi tätä pienemmäksi. Kuten liitteessä 1 laskettiin jousivakio liukukannattimille, voidaan jousivakio laskea myös vedetylle sauvalle. Kimmokerroin E on määrittelynsä mukaan jännityksen suhde venymään, joten:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L} \rightarrow F = \frac{EA\Delta L}{L} \quad (L3.3)$$

Kimmokerroin E , MPa

Jännitys σ , MPa

Venymä ε

Voima F , N

Poikkileikkauksen ala A , mm²

Sauvan pituus L , m

Sauvan pituuden muutos ΔL , m

Sijoittamalla voima F liitteen 1 yhtälöön L1.1 saadaan jousivakiolle k laskentalauseke:

$$k = -\frac{F}{\Delta L} = -\frac{EA}{L} \quad (\text{L3.4})$$

Jos siis käytetyn diagonaalisauvan profiili olisi 36 mm vetotanko (poikkileikkauksen ala 1018 mm²)

$$k = -\frac{EA}{L} = -\frac{210\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 1018 \text{ mm}^2}{6,4 \text{ m}} = -33399 \text{ kN/m} \quad (\text{L3.5})$$